

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
Doc. dr. sc. Darko Landek

Ivana Andrić

Zagreb, veljača 2011.

SAŽETAK

Toplinska naprezanja nastaju u svim postupcima toplinske obrade metala kod kojih metali pokazuju osjetljivost na distribuciju topline prilikom ugrijavanja isto kao i kod hlađenja. Sklonost nastajanju toplinskih naprezanja pripisuje se sljedećim čimbenicima:

- razlikama temperature između pojedinih dijelova obratka (rubnih slojeva i jezgre),
- temperaturno ovisnim toplinskim svojstvima materijala obratka,
- temperaturno ovisnoj granici razvlačenja materijala obratka,
- obliku i mjerama obratka, odnosno njegovom volumenu (V) i ploštini površine (A) kroz koju se dovodi ili odvodi toplina,
- mehanizmima prijenosa topline (konvekcija, toplinsko zračenje, provođenje, isparivanje sredstva za gašenje)

Temperaturno ovisna granice razvlačenja i vlačna čvrstoća ograničavaju iznose dozvoljenih naprezanja u materijalu, a prekoračenjem njihovih dozvoljenih iznosa naprezanja materijal se počinje plastično deformirati.

U okviru ovog završnog rada promatrana su toplinska naprezanja i njima uzrokovane deformacije roto rašpe, izrađene od hladno valjanog nelegiranog ugljičnog čelika oznake EN 10130, pri procesima toplinske obrade bez faznih pretvorbi.

U eksperimentalnom dijelu istražena je pojava toplinskih deformacija u procesima žarenja. Rezultati ispitivanja toplinskih deformacija ukazuju na značajan utjecaj vremena žarenja položaja obradaka pri hlađenju s temperature žarenja. Nastanak toplinskih deformacija na ispitivanim uzorcima (u polaznom, hladno deformiranom stanju) potpomognut je i rekristalizacijskim procesima u mikrostrukturi čelika koji su prisutni na temperatuarama žarenja od 380 do 600 °C.

ABSTRACT

Thermal stresses are generated in heat distribution sensitive metals during any heat treatment. Tendency of thermal stress formation is followed by these factors:

- initial temperature of the component
- temperature gradient between different parts of the component (boundary layer and the core)
- temperature dependent heat properties of the material
- temperature dependent yield strength of the material
- shape and dimensions of component – volume (V) and area (A) exposed to thermal conduction
- temperature of the quenching media
- mechanisms of thermal conduction (convection, heat radiation, conduction, evaporation of quenching media)
- heat capacity
- density
- thermal expansion coefficient
- Young's modulus and Poisson's ratio

Temperature dependent yield and tensile strength limit the amounts of the allowed stresses into a certain material. Plastic deformation starts to propagate along the material exceeding those allowed amounts of stresses, because of complexity of system (macro and micro) that limit is too much sensitive to determinate exactly.

Therefore, this review focuses on the thermal stresses and caused deformations which are observed in cold rolled carbon steel EN 10130 samples exposed to transformation-free heat treatment processes.

Investigation refers to appearance of thermal deformations caused during annealing processes. Results of investigation indicate on significant influence of some parameters of annealing (time of holding sample on temperature of annealing process, position of components during quenching from annealing temperature to room temperature). Propagation of thermal deformation on examined samples (initial state: cold rolled state) is supported by recrystallization processes into a steel microstructure presented on annealing temperature 380-600°C.

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
SADRŽAJ	III
POPIS SLIKA	V
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA	VIII
IZJAVA	X
1. UVOD	1
2. TOPLINSKA NAPREZANJA.....	2
2.1. Nastanak toplinskih naprezanja u linearno- elastičnim materijalima.....	2
2.2. Zaostala naprezanja	15
2.3. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja	19
3. TOPLINSKE DEFORMACIJE.....	20
3.1. Nastanak deformacija u postupcima toplinske obrade	20
3.2. Utjecajni čimbenici na pojavu deformacija.....	23
3.2.1. Svojstva materijala	23
3.2.2. Homogena svojstva duž poprečnog presjeka materijala	24
3.2.3. Magnituda i distribucija zaostalih naprezanja	24
3.2.4. Geometrija izratka	25
3.3. Deformacija uzrokovana ugrijavanjem obratka	28
3.3.1. Promjena oblika nastala zbog oslobađanja zaostalih naprezanja	28
3.3.2. Promjena oblika nastala zbog toplinskih naprezanja uzrokujući plastično tečenje	28
3.3.3. Promjena volumena nastala tijekom fazne transformacije grijanjem	29
3.4. Deformacije nastale pri samoj temperaturi obrade	29
3.4. Deformacija nastala tijekom procesa gašenja	30
3.4.1. Rashladni medij.....	30
3.4.2. Strujanje sredstva za gašenje.....	35
3.4.3. Utjecaj veličine obratka.....	36
3.4.4. Utjecaj stanja površine obratka	36
3.4.4.1. Utjecaj površinske hrapavosti	36
3.4.4.2. Utjecaj oksida ili prevučenih slojeva	36
3.5. Minimizacija deformacija u postupcima toplinske obrade	37
3.5.1. Optimalan izbor čelika	37

3.5.2. Optimalna konstrukcija obratka	38
3.5.3. Ispravna provedba toplinske obrade.....	38
4. Priprema i provedba ispitivanja.....	40
4.1. Ispitni uzorak.....	40
4.1.1. Kemijski sastav ispitnog uzorka.....	41
4.2. Plan pokusa	42
4.3. Priprema uzorka za metalografsku analizu i ispitivanje mikrotvrdoće	45
4.3.1. Uzorkovanje i zalijevanje u polimernu masu	45
4.3.2. Brušenje metalografskih uzoraka	45
4.3.3. Poliranje metalografskih uzoraka.....	46
5. Rezultati ispitivanja i analiza rezultata.....	48
5.1. Ispitivanje toplinskih deformacija	48
5.2. Analiza mikrostrukture.....	54
5.3. Ispitivanje mikrotvrdoće	56
6. Zaključak.....	57
7. Literatura	58

POPIS SLIKA

Slika 1. Opći dijagram toplinske obrade za obradak (npr. valjak) koji predstavlja slabije vodljivo tijelo [1]	2
Slika 2. Dijagram ovisnosti naprezanja σ – istezanja ε sa označenim elastičnim odnosno plastičnim područjem istezanja za konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju [2]	4
Slika 3. Primjena granice razvlačenja R_e i vlačne čvrstoća R_m čelika 16MnCr5 i 18CrNiMO7-6 s porastom temperature [3]	4
Slika 4. Toplinsko širenje.....	6
Slika 5. Ovisnost toplinske ekspanzije čelika o temperaturi prema Bletzacker-ovim podacima istraživanja [4]	7
Slika 6. Uklješteni štap.....	8
Slika 7. Prikaz nastanka toplinskih naprezanja rubnog sloja i jezgre prilikom ugrijavanog valjka [3],[5].....	9
Slika 8. Prikaz nastanka toplinskih naprezanja rubnog sloja i jezgre ohlađivanog valjka [3], [5]	10
Slika 9. Shematski prikaz promjene temperature i longitudinalnih naprezanja tijekom hlađenja valjka bez mikrostrukturnih faznih pretvorbi od realnog nelinearno-elastičnog materijala [3].....	12
Slika 10. Shematski prikaz zaostalih naprezanja u dvofaznom materijalu nakon gašenja [3].....	17
Slika 11. Shematski prikaz definicije prvog, drugog i trećeg reda zaostalih naprezanja [3]	18
Slika 12. Deformacije volumena -lijevo, deformacije oblika –desno [5]	21
Slika 13. Prikaz nepravilnog i pravilnog oblikovanja obratka za toplinsku obradu [6].....	26
Slika 14. Mogućnost rješavanja problema oštih rubova kao koncentratora naprezanja [6]	27
Slika 15. Primjer distribucije topline pri odabiru različitog sredstva za hlađenje [7]	32
Slika 16. Utjecaj medija za gašenje na distorziju pri hlađenju JIS S45C ugljičnog čeličnog diska gašenog u mirnom mediju. Dimenzije uzorka bile su 30mm promjer i debljina 10mm. (a) Distribucija deformacije u aksijalnom smjeru. (b) Distribucija deformacije u radijalnom smjeru [7]	33
Slika 17. Utjecaj sredstva za gašenje na zaostala naprezanja bočnu površinu diska od JIS S45C ugljičnog čelika gašenog u mirnom mediju. Dimenzije uzorka su 30mm promjer, i 10mm debljina. (a) Obodno naprezanje na vanjskoj površini. (b) Radijalno naprezanje na vanjskoj površini [7]	34
Slika 18. Utjecaj agitacije u vodi na nastajanje deformacije prilikom gašenja JIS S45C ugljičnog čeličnog diska. Dimenzije uzorka su 30mm promjer, 10mm debljina. Rashladni medij je gradska voda 30°C. Brzina strujanja: (a) mirna voda, (b) 0.3 m/s, i (c) 0.7 m/s. [7]	35
Slika 19. Utjecaj agitacije u polimernom sredstvu za hlađenje na nastajanje deformacije prilikom gašenja JIS S45C diska od ugljičnog čelika. Dimenzije uzorka 30mm promjer, 10mm debljina. Rashladni medij je 10% polimer (PAG) temperature 30°C. Brzina strujanja: (a) mirna voda, (b) 0.3 m/s, i (c) 0.7 m/s. [7]	35
Slika 20. Utjecaj strujanja rashladnog medija na smjer deformacije [8]	39

Slika 21. Roto rašpa	41
Slika 22. Dijagrami plana postupaka toplinske obrade žarenja	43
Slika 23. Isječak roto-rašpe za mikrostrukturnu analizu polaznog stanja	45
Slika 24. Shematski prikaz opisane zamišljene kružnice kojoj pripadaju mjerna mjesta [(1),(2),(3),..., (12)] koja čine vrhove dvanaesterokuta sa stranicama dužine ΔL . Stranice dvanaesterokuta ΔL_i čine promjenu udaljenosti između susjednih mjernih mjesta na obodu uzorka. ΔL_i , d_1 , d_2 su veličine temeljem kojih se mogu pratiti deformacije nakon pojedinog procesa žarenja	49
Slika 25. Mikrostrukturno stanje slučajno odabranog uzorka pri različitim povećanjima (50x, 100x, 200x, 500x, 1000x) prije toplinske obrade žarenja na odabranom mjestu I na uzorku	55
Slika 26. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće	56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav ispitnih uzoraka.....	41
Tablica 2. Mehanička svojstva ispitnih uzoraka (zamijeniti mjesta Rm i Rp).....	41
Tablica 3. Parametri žarenja ispitnih uzoraka od čelika HRN EN 10130.....	44
Tablica 4. Parametri brušenja metalografskih uzoraka	46
Tablica 5. Parametri poliranja metalografskih uzoraka	47
Tablica 6. Rezultati ispitivanja promjene udaljenosti između mjernih mjesta na obodu ispitnih uzoraka nakon ispitivanih postupaka žarenja na 380 i 600 oC	50
Tablica 7. Rezultati ispitivanja promjene udaljenosti između mjernih mjesta na obodu ispitnih uzoraka nakon ispitivanih postupaka žarenja s predgrijavanjem	52

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
A	m ²	površina
Ac ₁	°C	točka pretvorbe
A ₅	%	istezanje, istezljivost (za dimenzije epruvete L ₀ = 5 D ₀)
Bi		Biotova značajka
E	N/mm ²	modul elastičnosti
L ₁	mm	duljina štapa
ΔL ₁	mm	produljenje štapa prilikom zagrijavanja
P		parametar popuštanja (Larson-Miller)
R _{eh}	N/mm ²	granica razvlačenja gornja
R _k	N/mm ²	konačno naprezanje
R _{el}	N/mm ²	granica razvlačenja donja
R _m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
T	K	apsolutna temperatura
t	h	trajanje (vrijeme)
t _{max}	h	vrijeme pri maksimalnoj temperaturnoj razlici
V	m ³	volumen
X	m	karakteristična dimenzija presjeka
Grčka slova		
α	K ⁻¹	linearni koeficijent toplinske dilatacije
ε	%, mm/mm	koeficijent razvlačenja,

		koeficijent (deformacije, oblikovanja)
ε_{pl}	%, mm/mm	stupanj plastične deformacije
ε_{el}	%, mm/mm	stupanj elastične deformacije
ε_{θ}	%, mm/mm	koeficijent toplinskog razvlačenja
ϑ_r	°C	temperatura ruba
ϑ_j	°C	temperatura jezgre
$\Delta\vartheta$	°C	temperaturna razlika
λ	W/m K	koeficijent toplinske vodljivosti
σ_{dop}	N/mm ²	dopušteno naprezanje
σ^{RSI}	N/mm ²	zaostala naprezanja prvog reda
σ^{RSI}	N/mm ²	zaostala naprezanja drugog reda
σ^{RSI}	N/mm ²	zaostala naprezanja trećeg reda
$\sigma_{top, (\sigma_{th})}$	N/mm ²	toplinska naprezanja
$\sigma_{th,eq}$	N/mm ²	ekvivalentna toplinsko naprezanje
$\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$	N/mm ²	glavna naprezanja u teoriji čvrstoće

IZJAVA

Izjavljujem da sam Završni rad radila samostalno, koristeći navedenu literaturu i stečeno znanje tijekom preddiplomskog studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Darku Landeku na stručnoj pomoći i podršci tijekom izrade ovog Završnog rada. Također zahvaljujem gospođi Nadi Vargi i Mateji Šnajdar, mag. ing. prilikom metalografske pripreme uzoraka za ispitivanje, te Saši Kovačiću, mag.ing. na pomoći pri ispitivanju tvrdoće ispitnih uzoraka. Zahvaljujem se također i gospođi Danici Rožman na velikoj podršci tijekom studiranja.

Hvala mojoj obitelji pogotovo bratu Ivanu Andriću mag. ing. silv na nesebičnoj pomoći i podršci tijekom cijelog studiranja a posebno pri pisanju završnog rada.

Ivana Andrić

1. UVOD

U mnogim procesima proizvodnje čeličnih komponenti, toplinska obrada predstavlja najosjetljiviji postupak koji uključuje neočekivane i nekontrolirane deformacije. Da bi se osigurala optimalna kombinacija svojstava i visoka kvaliteta završne obrade čeličnih obradaka, u nizu slučajeva treba primijeniti postupke toplinske obrade.

Toplinska obrada čelika često obuhvaća grijanje čelika na visoke temperature, držanje na toj temperaturi određeno vrijeme, i nakon toga brzo hlađenje odnosno gašenje. Ovi procesi su nužni pri postizanju dobrih mehaničkih svojstava ali oni također mogu uzrokovati da obradak promjeni oblik na nepredviđeni način osim ako parametri obrade nisu precizno i točno regulirani. Većina grešaka u postupcima toplinske obrade pojavljuje se uslijed pogrešnog izvođenja pojedinih faza u postupku toplinske obrade (kao što je pregrijavanje i spaljivanje, neujednačeno ugrijavanje i gašenje), uslijed neadekvatnog kemijskog sastava čelika, neprikladne završne obrade brušenjem, ili zbog loše i ne tehnološki konstrukcije obratka. Iako deformacija dijelova može postati primjetna tek nakon toplinske obrade, glavni uzrok može biti u nekom drugom proizvodnom postupku koji je stvorio zaostalo naprezanje, koje će se naknadno razgraditi plastičnom deformacijom u postupku toplinske obrade.

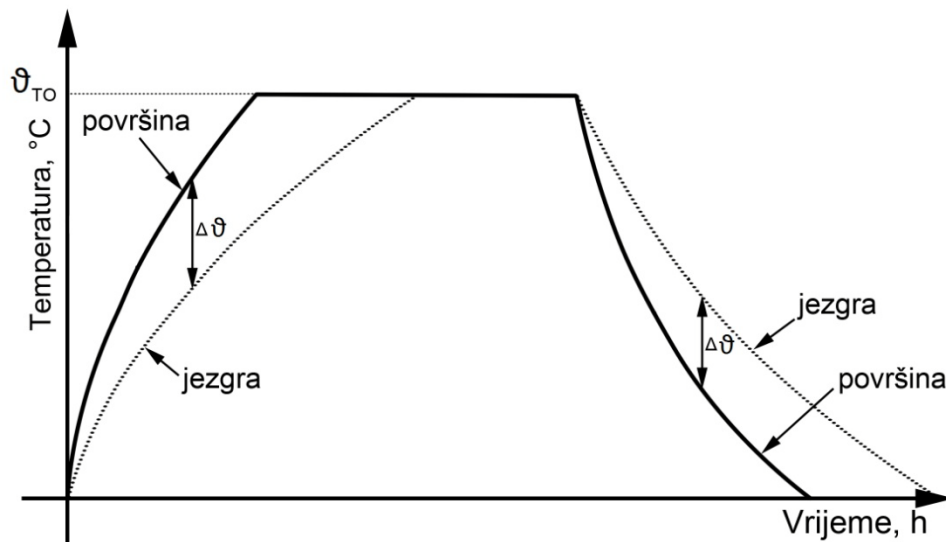
Zbog zahtjeva na veliku dimenzijsku točnost strojnih dijelova i alata, deformacije postaju sve veći problem. Za njegovo rješavanje treba uzeti u obzir ne samo jedan proizvodni postupak, već čitav proizvodni proces za izradu konkretnog obratka. Poznato je da gotovo svaki korak u proizvodnom procesu može utjecati na konačan oblik, dimenzije i svojstva obratka. Pri tome postoji niz različitih utjecajnih čimbenika koji određuju zaostala naprezanja i deformacije u obratku čiji je utjecaj teško točno predvidjeti. To vodi do definicije trajne (plastične) deformacije pri toplinskoj obradi, kao neočekivane i nestalne promjene veličine ili oblika obratka uzrokovane nizom utjecajnih čimbenika porijekolom od materijala obratka i parametara svih postupaka primjenjenih u proizvodnom procesu.

U radu će se ispitati prisutnost toplinskih deformacija pri različitim režimima toplinske obrade.

2. TOPLINSKA NAPREZANJA

2.1. Nastanak toplinskih naprezanja

Uzrok pojave toplinskih naprezanja vidljiv je već iz općeg dijagrama toplinske obrade, slika 1. Pri grijanju i hlađenju termodinamički masivnijih obradaka pojavljuje se temperaturna razlika između jezgre i ruba obratka. Temperaturna razlika između rubnog sloja i jezgre obratka biti će tim veća što je veća brzina ugrijavanja, što je veći volumen (masa) grijanog obratka, što je niži koeficijent toplinske vodljivosti, što je viši koeficijent prijelaza topline itd.



Slika 1. Opći dijagram toplinske obrade za obradak (npr. valjak) koji predstavlja slabije vodljivo tijelo [1]

Pod pretpostavkom da je koeficijent toplinske vodljivosti $\lambda = \infty$, unutar idealnih materijala provođenje i odvođenje topline duž presjeka obratka ne iziskuje vrijeme izjednačavanja temperature ruba i jezgre pa su toplinska naprezanja $\sigma_{top} = 0$. Realni metalni materijali, međutim, po presjeku grijanog predmeta pri ugrijavanju i hlađenju neprestano pokazuju temperaturne razlike $\Delta\vartheta > 0$. Kad je temperaturna razlika zanemarivo mala, tj. kada se radi o razmjerno malim debljinama presjeka metalnih obradaka, oni se promatraju kao tzv. “termodinamički tanki predmeti”, što znači da se njihov presjek isti čas ugrijava i progrijava. U protivnom, predmet

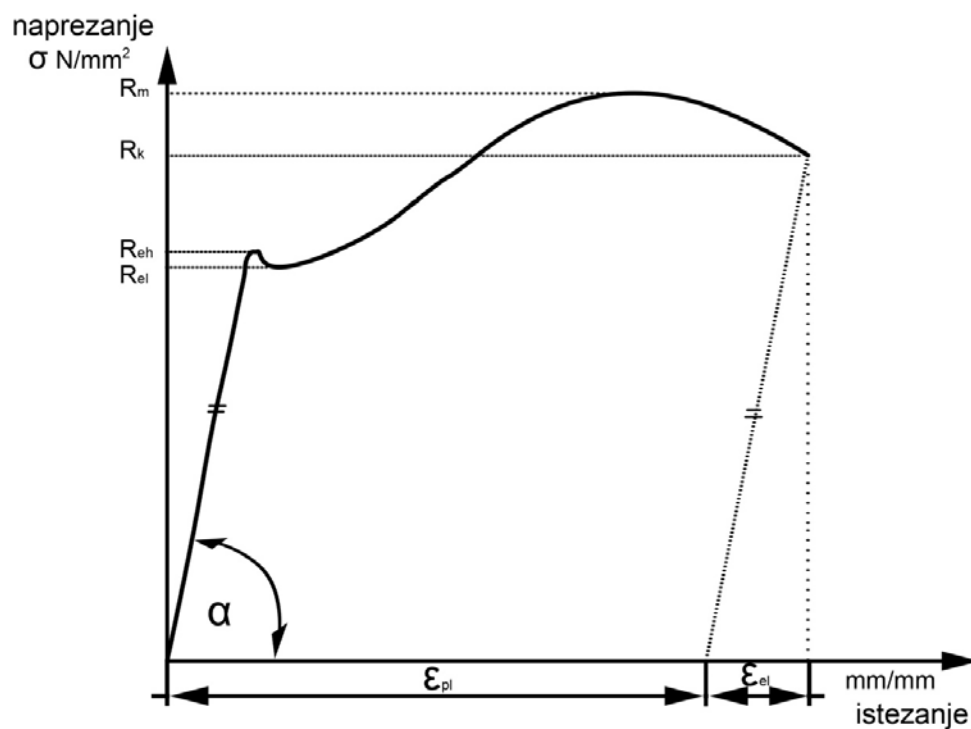
treba smatrati “termodinamički masivnim“. “Tankost“ i “masivnost“ predmeta ne ovise samo o dimenzijama predmeta nego i o fizikalnim svojstvima, što izražava Biotov broj:

$$Bi = \frac{\alpha X}{\lambda} \quad (1)$$

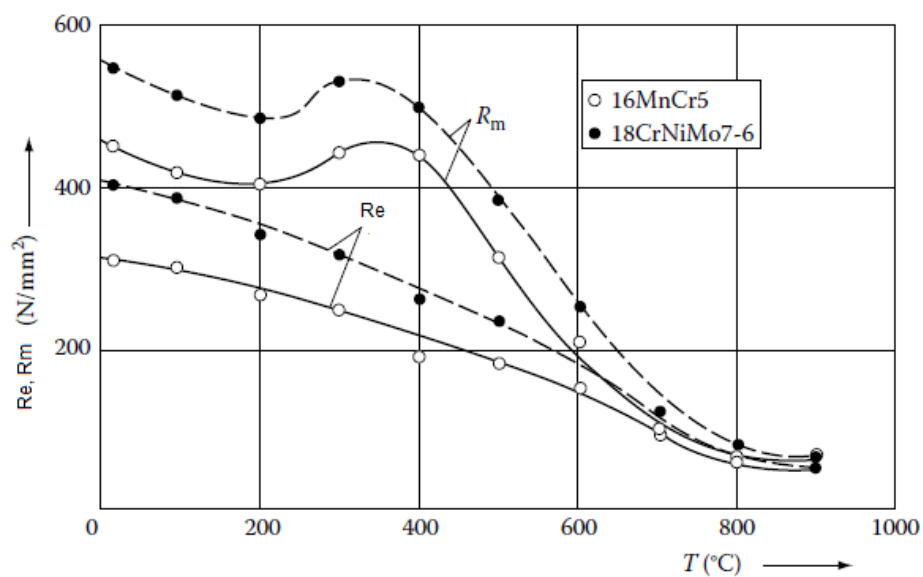
gdje je α , W/m²K-koeficijent konvekcijskog prijelaza topline; λ , W/mK- koeficijent toplinske vodljivosti; X,m- karakteristična dimenzija presjeka.

Brzina ugrijavanja također je utjecajni faktor pri ugrijavanju masivnog predmeta. U slučaju sporog ugrijavanja čak i dimenzijski masivan predmet bi se mogao smatrati “termodinamički tankim“, odnosno takvim da je $\vartheta \approx \vartheta_j$ i $\vartheta_r - \vartheta_j = 0$. Budući da u praksi sporo ugrijavanje gotovo i ne dolazi u obzir, kao pokazatelj “termodinamičke tankoće“ može poslužiti Biotova značajka. Ako je Biotova značajka $Bi \leq 0,25$, predmet se smatra tankim, a ako je $Bi > 0,25$ predmet je masivan te time stvara povoljne uvjete za pojavu toplinskih naprezanja.

Metalni materijali pod djelovanjem naprezanja pokazuju elastično-plastičnu deformaciju, što se može pratiti snimanjem dijagrama: “naprezanje (σ) - istezanje (ϵ)”, slika 2. Snimanjem " $\sigma - \epsilon$ dijagrama" pri povišenim temperaturama dobiva se ovisnost mehaničkih svojstva (granica razvlačenja (R_e), vlačne čvrstoće (R_m), istezljivosti (A_5)) o temperaturi. Granica razvlačenja (R_e) i vlačna čvrstoća čelika (R_m) značajno se snižavaju s porastom temperature. Na slici 3 prikazana je promjena granice razvlačenja i vlačne čvrstoće zavisnih od temperature na primjeru čelika za cementiranje, 16MnCr5 i nehrđajućeg čelika, 18CrNiMo7-6.



Slika 2. Dijagram ovisnosti naprezanja σ – istezanja ϵ sa označenim elastičnim odnosno plastičnim područjem istezanja za konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju [2]



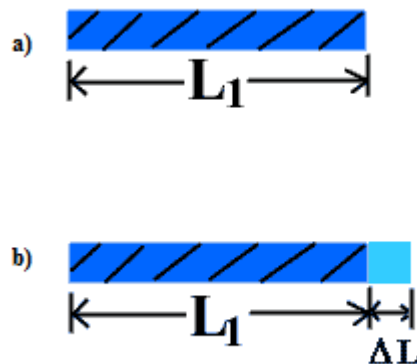
Slika 3. Primjena granice razvlačenja R_e i vlačne čvrstoća R_m čelika 16MnCr5 i 18CrNiMo7-6 s porastom temperature [3]

Ako tijekom postupka toplinske obrade naprezanja u obratku prijeđu iznos granice razvlačenja, na bilo kojoj temperaturi (u bilo kojem dijelu obratka), pojaviti će se elastično-plastična deformacija. Temperaturno ovisna granice razvlačenja i vlačna čvrstoća ograničavaju iznose dozvoljenih naprezanja u materijalu. Iz slike 3 slijedi da se iznosi granice razvlačenja uobičajenih konstrukcijskih čelika snižavaju i po nekoliko puta u odnosu na iznos R_e na sobnoj temperaturi te kod njihove toplinske obrade postoji stalna opasnost od pojave plastičnih deformacija, uslijed previsokih toplinskih i transformacijskih naprezanja.

Općenito nastanak toplinskih naprezanja ovisi o:

- razlikama temperature između pojedinih dijelova obratka,
- temperaturno ovisnim toplinskim svojstvima materijala obratka,
- temperaturno ovisnoj granici razvlačenja materijala obratka,
- obliku i mjerama obratka, odnosno njegovom volumenu (V) i ploštini površine (A) kroz koju se dovodi ili odvodi toplina,
- mehanizmima prijenosa topline (konvekcija, toplinsko zračenje, provođenje, isparivanje sredstva za gašenje)

Na primjeru ugrijavanja štapa, na slici 4, objasniti će se pojava toplinskih deformacija uslijed djelovanja toplinskih naprezanja.



Slika 4. Toplinsko širenje štapa neučvršćenih krajeva uslijed promjene temperature

Štap na slici 4. ima pri temperaturi ϑ duljinu L_1 . Ugrije li se štap na temperaturu $\vartheta + \Delta\vartheta$, produljit će se za iznos:

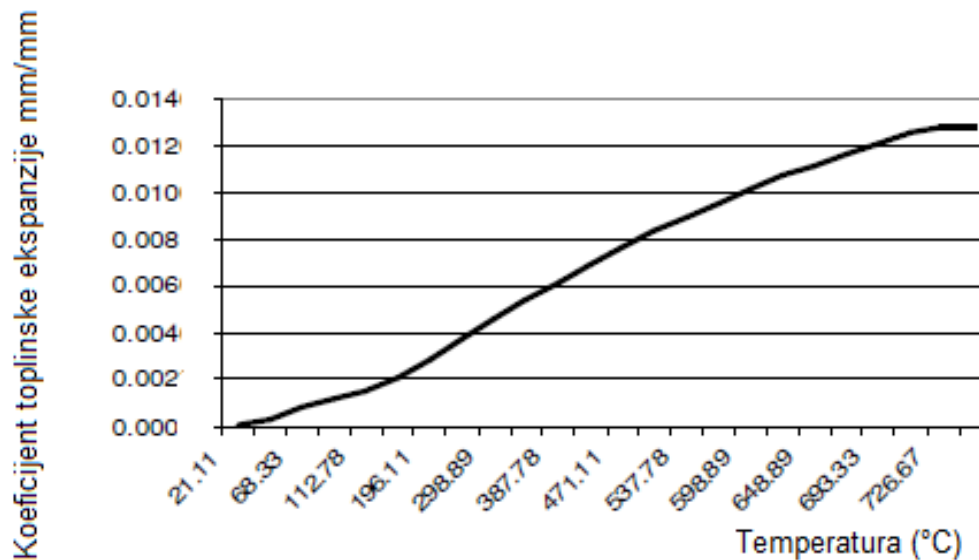
$$\Delta L_{\vartheta} = \alpha L_1 \Delta\vartheta \quad (2)$$

gdje je α koeficijent toplinskog rastezanja, a $\Delta\vartheta$ promjena temperature. Eksperimenti pokazuju da se koeficijent α može smatrati konstantnim pri malim promjenama temperature ($\vartheta = 100$ do 200°C). Vrijednost koeficijenta toplinskog rastezanja s porastom temperature raste što se može vidjeti na slici 5.

$$\varepsilon_{\text{top}} = (-2,416 \times 10^{-4}) + (1,2 \times 10^{-8} \vartheta) + (0,4 \times 10^{-8} \vartheta^2) \quad \text{pri } \vartheta \leq 750^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{top}} = (0,011) \quad \text{pri } 750^\circ\text{C} < \vartheta \leq 860^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\text{top}} = -0,062 + (2 \times 10^{-5} \vartheta) \quad \text{pri } \vartheta > 860^\circ\text{C} \quad (5)$$



Slika 5. Ovisnost toplinske ekspanzije čelika o temperaturi prema Bletzacker-ovim podacima istraživanja [4]

Podijelimo li izraz (2) s L_1 , dobit ćemo istežljivost:

$$\varepsilon_{\vartheta} = \frac{\Delta L_{1\vartheta}}{L_1} = \alpha \Delta \vartheta \quad (6)$$

gdje je ε_{ϑ} duljinska deformacija izazvana promjenom temperature. Ako je štap istovremeno opterećen i ugrijan, deformacija iznosi

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} + \alpha \Delta \vartheta \quad (7)$$

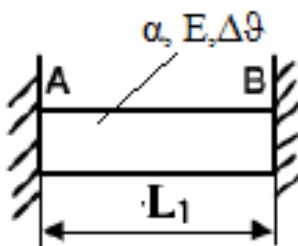
Kad je potpuno ili djelomično onemogućeno širenje štapa, u njemu će se pojaviti toplinska naprežanja. Ako je štap učvršćen bez prednaprežanja između dvije krute i nepomične stjenke, kako je prikazano na slici 6, pri promjeni temperature za iznos $\Delta \vartheta$, u štapu će se pojaviti tlačna

toplinska naprezanja. Pri tome je, zbog nepomičnih stijenki i krajeva štapa ukupna deformacija jednaka je nuli:

$$\varepsilon_x = \alpha \Delta\vartheta + \frac{\sigma_x}{E} = 0 \quad (8)$$

odakle slijedi jednačba toplinskih naprezanja uklještenog štapa:

$$\sigma_{\text{top}} = \alpha E \Delta\vartheta \quad (9)$$



Slika 6. Uklještteni štap izložen promjeni temperature

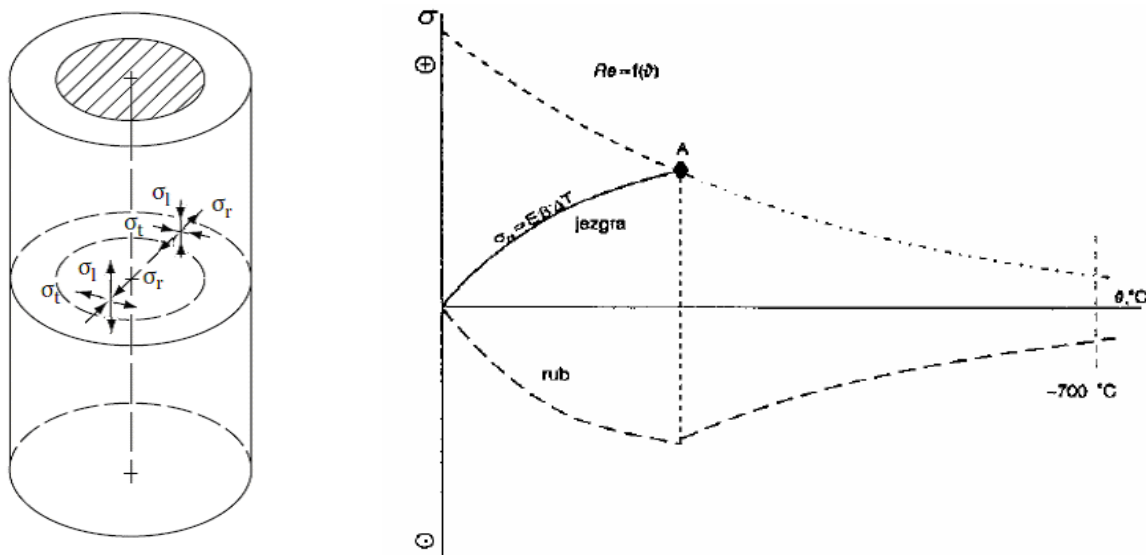
U jednačbama (8) i (9) σ_x predstavljaju tlačna toplinska naprezanja ovisna o temperaturnoj razlici (tj. $\sigma_{\text{top}} = f(\Delta\vartheta)$) E je modul elastičnosti materijala, α je koeficijent toplinske dilatacije $[K^{-1}]$, $\Delta\vartheta$ predstavlja razliku temperature jezgre i površine.

U cilju izbjegavanja toplinskih napetosti razlika temperature između rubnih slojeva i jezgre obratka nastoji se održati što nižom. Tako će pri ugrijavanju rubni slojevi obratka imati višu temperaturu nego jezgra pa će se rubni slojevi nastojati jače rastegnuti nego jezgra. No, kako rub i jezgra nisu odvojeni (slobodni lokaliteti) nego su međusobno čvrsto povezani u materijalnu cjelinu, to će hladnija jezgra sprečavati rub u njegovu nastojanju za rastezanjem, dok će topliji rubni slojevi djelovati na jezgru u smislu težnje za razvlačenjem jezgre.

U slučaju prekoračenja granice razvlačenja, posebno pri povišenim temperaturama, doći do trajne deformacije (posebno u vlačno napregnutim lokalitetima u kojima će nastupiti rasterećenje naprezanja kroz plastičnu deformaciju). Stoga će stvarni maksimalni iznos zaostalih naprezanja nakon završetka postupka toplinske biti jednak granici razvlačenja na određenoj kritičnoj

temperaturi na kojoj je počela razgradnja toplinskih napetosti plastičnom deformacijom. Iz navedenog slijedi da će ranije spomenuti zakon rasta toplinskih napetosti iz jednadžbi (8) i (9) vrijediti samo do časa postignuća iznosa temperaturno ovisne granice razvlačenja (slika 7).

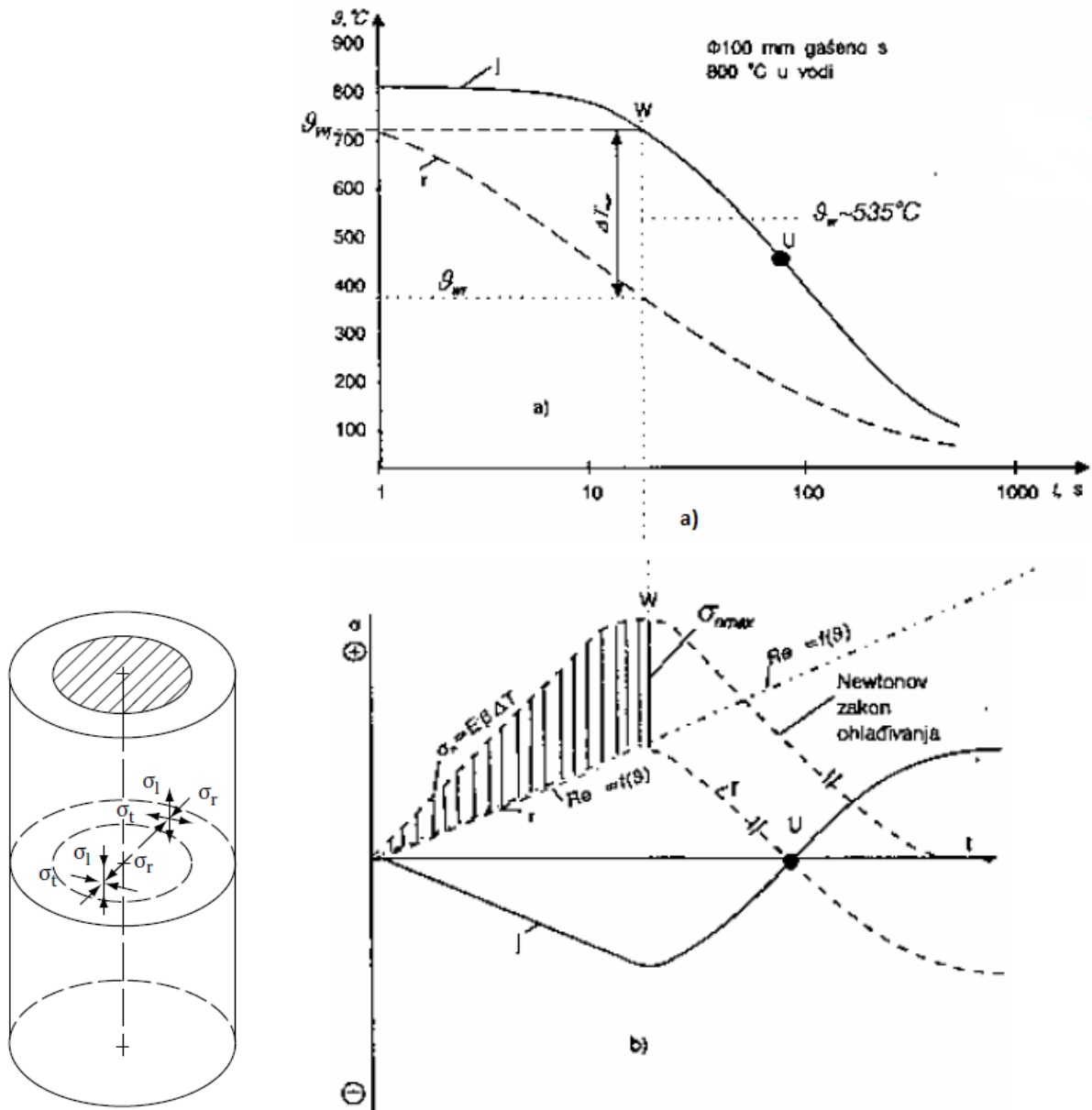
Rast temperature u početku ugrijavanja izaziva i povećanje temperaturne razlike $\vartheta = \vartheta_r - \vartheta_j$. Vlačne napetosti jezgre rastu po zakonu toplinskih naprezanja (8, 9). U rubnim slojevima uspostavljaju se tlačne napetosti. U točki "A", u dijagramu na slici 7, toplinska naprezanja izjednačavaju se s iznosom granice razvlačenja, pa će prema ranije rečenom, pa će se vlačne napetosti smanjiti izazivajući trajnu deformaciju i daljnja promjena naprezanja bit će određena iznosom granice tečenja ovisnim od temperature, tj. prema zakonu $R_e = f(\vartheta)$. Pri temperaturi oko 700°C svi će čelici (osim onih za rad pri povišenim i visokim temperaturama) imati granicu razvlačenja samo 40 do 60 N/mm², pa će se i napetosti ugrijavanja nalaziti na istoj razini.



Slika 7. Prikaz nastanka toplinskih naprezanja rubnog sloja i jezgre prilikom ugrijavanja valjka [3],[5]

Ukoliko bi se valjak s temperature 600...700°C hladio vrlo sporo (npr. brzinom oko 30K/h), ne bi se mogla uspostaviti veća razlika temperature između jezgre i ruba i ne bi nastajale nove napetosti (ohlađivanja). Opisana pojava snižavanja granice razvlačenja s povišenjem temperature

te poprimanja iznosa napetosti samo do iznosa granice razvlačenja osnova je žarenja za redukciju napetosti. No ukoliko bi ohlađivanje s tih visokih temperatura teklo tako brzo da se uspostave veće temperaturne razlike $\Delta \vartheta = \vartheta_r - \vartheta_j$ (jer je sada očito $\vartheta_r > \vartheta_j$) nastale bi napetosti ohlađivanja (odnosno gašenja), shematski prikazane slikom 8.

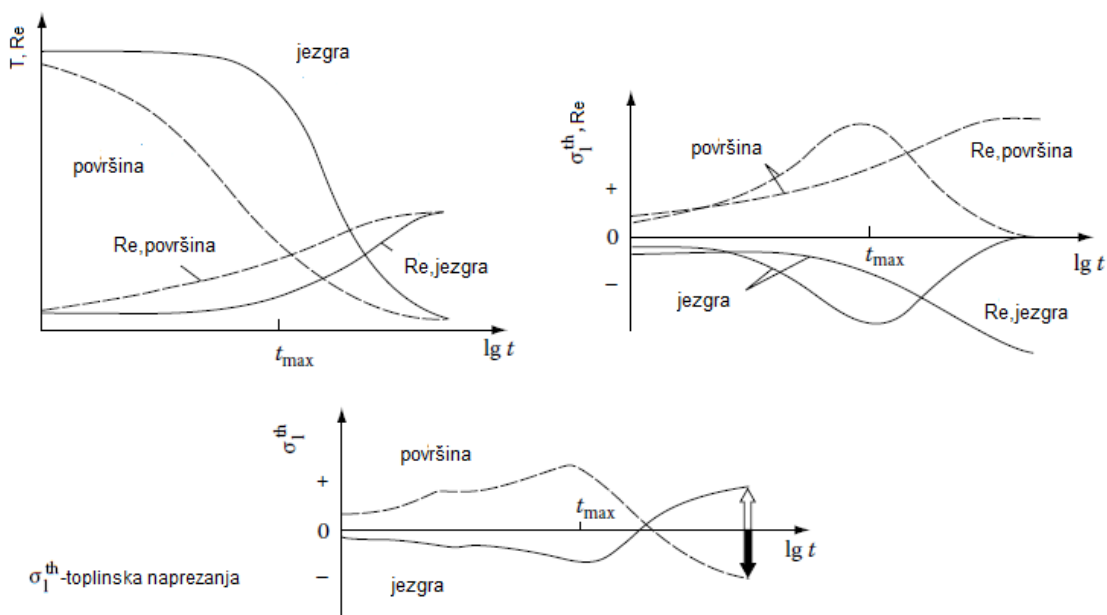


Slika 8. Prikaz nastanka toplinskih naprezanja rubnog sloja i jezgre ohlađivanog valjka [3] , [5]

Prema tvrdnjama A. Rose-a trebalo bi razumjeti nastanak napetosti u materijalu, te na osnovi takve spoznaje poduzeti mjere za njihovo sniženje. Toplinske napetosti nastale tijekom ohlađivanja za praksu su još važnije nego one nastale tijekom ugrijavanja, budući da napetosti ohlađivanja uz to što uzrokuju deformaciju još i zaostaju u obratku nakon hlađenja, što snižava granicu tečenja i čvrstoću obratka. Na slici 8 može se primijetiti da do točke "W" brzina ohlađivanja ruba je bila veća nego brzina ohlađivanja jezgre. Pošto je rub valjka u neposrednom dodiru sa sredstvom za hlađenje, on se u početku ohlađuje brže i nastoji se stegnuti, a toplija jezgra ga u tome spriječava, pa u rubnom sloju nastaju vlačne napetosti. Uz pretpostavku da gašeni čelik može primiti vlačna naprezanja potpuno elastično, naprezanja do točke "W", na dijagramu na slici 8, rasla bi po zakonu $\sigma_n = \alpha E \Delta\vartheta$.

Nakon točke "W" mijenja se odnos brzina hlađenja ruba i jezgre i jezgra se počinje hladiti brže nego rub pa ona preuzima glavnu ulogu u nastanku napetosti i time rasterećuje rub. Kad se temperatura ruba i jezgre izjednače s temperaturom sredstva za gašenje u idealno elastičnom tijelu napetosti bi se snizile na nulu. Ta pretpostavka bila bi realna ako bi iznos granice razvlačenja za valjak bio beskonačno velik, što je potpuno ne realno. Tijek granice razvlačenja R_e po pretpostavki Rose-a, linearno raste u ovisnosti o temperaturi ϑ , međutim u stvarnosti je promjena $R_e = f(\vartheta)$ nešto drugačija.

Na slici 9. prikazane su krivulje hlađenja površine i jezgre čeličnog valjka bez mikrostrukturnih pretvorbi uz pretpostavku da su pri istim temperaturama identična vlačna i tlačna toplinska naprezanja. Također je prikazana promjena granice razvlačenja ovisne o temperaturi za rubni sloj i jezgru realnog čelika. Kada se valjak počinje ohlađivati, površinska temperatura se snižava brže od temperature jezgre, što uzrokuje nastanak vlačnih toplinskih naprezanja u površinskom sloju (u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru na površinu valjaka). Istovremeno u jezgri se stvaraju tlačna naprezanja. Iz slike 9 je uočljivo da je najveća temperaturna razlika $\Delta\vartheta_{\max}$ postignuta nakon određenog vremena hlađenja $t = t_{\max}$. Iz slike 9 je također očito da rubni sloj dostiže najveća vlačna toplinska naprezanja (u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru) prije vremena t_{\max} , a u jezgri se najveća tlačna toplinska naprezanja postižu poslije t_{\max} .



Slika 9. Shematski prikaz promjene temperature i longitudinalnih naprezanja tijekom hlađenja valjka bez mikrostrukturnih faznih pretvorbi od realnog nelinearno-elastičnog materijala [3]:

- tijek temperature i granice razvlačenja R_e prilikom hlađenja
- krivulje naprezanja površine jezgre s obzirom na promjenu granice razvlačenja $R_e = f(\vartheta)$
- ukupna longitudinalna naprezanja površine i jezgre nastala prilikom hlađenja ne idealnog materijala

Iznad određene temperature, ni površina ni jezgra više mogu podnijeti vlastita naprezanja bez pojave plastične deformacije. Plastična toplinska deformacija stvara se dok god su vlastita naprezanja u materijalu jednaka granici razvlačenja. To znači da je površina valjka plastično razvučena a jezgra plastično stlačena. Zanimajući bilo koji proces očvrnuća, navedena naprezanja su ograničena pripadajućom granicom razvlačenja materijala.

Nakon $t = t_{max}$ temperatura jezgre smanjuje se brže nego u rubnom sloju. To dovodi do smanjenja iznosa toplinskih naprezanja u cijelom presjeku. Toplinska naprezanja jezgre i površine razgrađuju se u nakon različitih vremena od početka hlađenja, a ostaje plastično deformirani valjak, izdužen (izbočen) u površinskom sloju i stlačen u jezgri. Uslijed daljnjeg hlađenja,

plastično izdužena i ohlađena površine sprječava daljnje skupljanje jezgre, uslijed čega počinje stvaranje vlačnih naprezanja jezgre i tlačnih naprezanja rubnog sloja.

Iz prethodne diskusije mogu se postaviti slijedeće zakonitosti nastanka toplinskih zaostalih naprezanja:

- Najveći iznos zaostalih toplinskih naprezanja je određen temperaturno ovisnom granicom razvlačenja materijala (R_e) na kojoj nastaju plastične deformacije;
- Općenito, plastične deformacije nastaju i na površini i u jezgri materijala;
- Za zadanu granicu razvlačenja, plastične će deformacije biti veće ako je veća amplituda naprezanja tijekom hlađenja. Iznos toplinskih naprezanja raste sa porastom koeficijenta toplinske dilatacije i sa porastom razlike temperaturne između površine i jezgre.
- Razlika temperature površine i jezgre ($\Delta\theta$) poprima veće iznose za višu temperaturu početka gašenja, manji koeficijentu prijenosa topline, i veće promjere valjaka;
- Plastična deformacija tijekom gašenja veća je što je niža granica razvlačenja na povišenim temperaturama. Granica razvlačenja na nižim temperaturama uobičajeno je viša od toplinskih naprezanja nastalih na povišenim temperaturama.
- Najveće vrijednosti toplinskih zaostalih naprezanja nastaju kad je najveća razlika temperaturne između površine i jezgre obratka.

Kako bi se predvidjela nastala plastična deformacija u obratku, vrijednost granice razvlačenja na određenom mjestu se uspoređuje s toplinskim naprezanjima nastalim na promatranom mjestu. Pri tom treba izračunati ekvivalentno naprezanje, npr. prema jednadžbi teorije najveće distorzijske energije ili HMM teorije. Teorija se zasniva na analizi gustoće distorzijske energije U_{od} , te pretpostavlja da će do opasnog stanja u materijalu doći onda kada ta energija dostigne kritičnu vrijednost $U_{od,dop}$.

$$U_{od} \leq U_{od,dop} \quad (10.a)$$

$$\frac{1+\nu}{6E} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq \frac{1+\nu}{3E} \sigma_{dop} \quad (10.b)$$

Iz čega slijedi opći zapis ekvivalentnog toplinskog naprezanja za razne kombinacije glavnih naprezanja:

$$\sigma_{th,eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (11)$$

$$\sigma_{th,eq} \leq \sigma_{dop} \quad (12)$$

$$\sigma_{th,eq} \leq Re(\vartheta) \quad (13)$$

gdje je $\sigma_{th,eq}$ -ekvivalentno toplinsko naprezanje, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ -glavna naprezanja.

Na osnovi HMM teorije, uzrok deformacija materijala može nastati ako naprezanje $\sigma_{th,eq}$ postigne vrijednost najvećih normalnih naprezanja, odnosno granice razvlačenja materijala.

Plastična deformacija može biti uzrokovana toplinskim naprezanjima, ali i transformacijskim naprezanjima, odnosno njihovom kombinacijom. Pošto se ove plastične deformacije uobičajeno ne raspodjeljuju homogeno po volumenu obratka uvijek se nakon postupaka grijanja na povišene temperature i hlađenja do sobne temperature, uz plastične deformacije mogu se pojaviti i zaostala naprezanja.

2.2. Zaostala naprezanja

Zaostala naprezanja prisutna su u obradcima poslije svakog procesa obrade koji opterećuje materijal. Gruba obrada metala (kovanje, valjanje i ekstruzija) provedena ispod temperatura toplog rada ($\vartheta < 250^{\circ}\text{C}$) izaziva naprezanja koja ostaju u materijalu. Kada se materijal obrađuje u području toplog rada ($\vartheta > 250^{\circ}\text{C}$) naprezanja se kontinuirano uklanjaju zbog sve većeg mehanizma difuzije a pritom i relaksacije mikrostrukture. Postupak deformiranja metala u području temperatura toplog rada podrazumijeva procese u kojima povišena duktilnost metala omogućava plastično deformiranje iznad temperature rekristalizacije. Proces rekristalizacije usporava očvrnuće materijala deformacijom a time granicu razvlačenja održava niskom. Procesi kao što su rezanje, brušenje i sačmarenje također stvaraju zaostala naprezanja ali u puno tanjem rubnom sloju. Naprezanja nastala tijekom proizvodnje oslobodit će se prilikom prvog ugrijavanja i izazvati plastičnu deformaciju (ili čak pukotine) u smjeru ovisnom o prisutnoj orijentaciji i predznaku naprezanja.

Tlačna zaostala naprezanja poželjna su u gotovom proizvodu jer omogućavaju bolju otpornost kontaktnim pritiscima i bolju dinamičku izdržljivost stoga se uzimaju u obzir prilikom konstruiranja proizvoda. Problemi nastaju kada obradak prije toplinske obrade sadrži sustav zaostalih naprezanja koji premašuje granicu razvlačenja uslijed čega nastaju nepredvidljive promjena oblika.

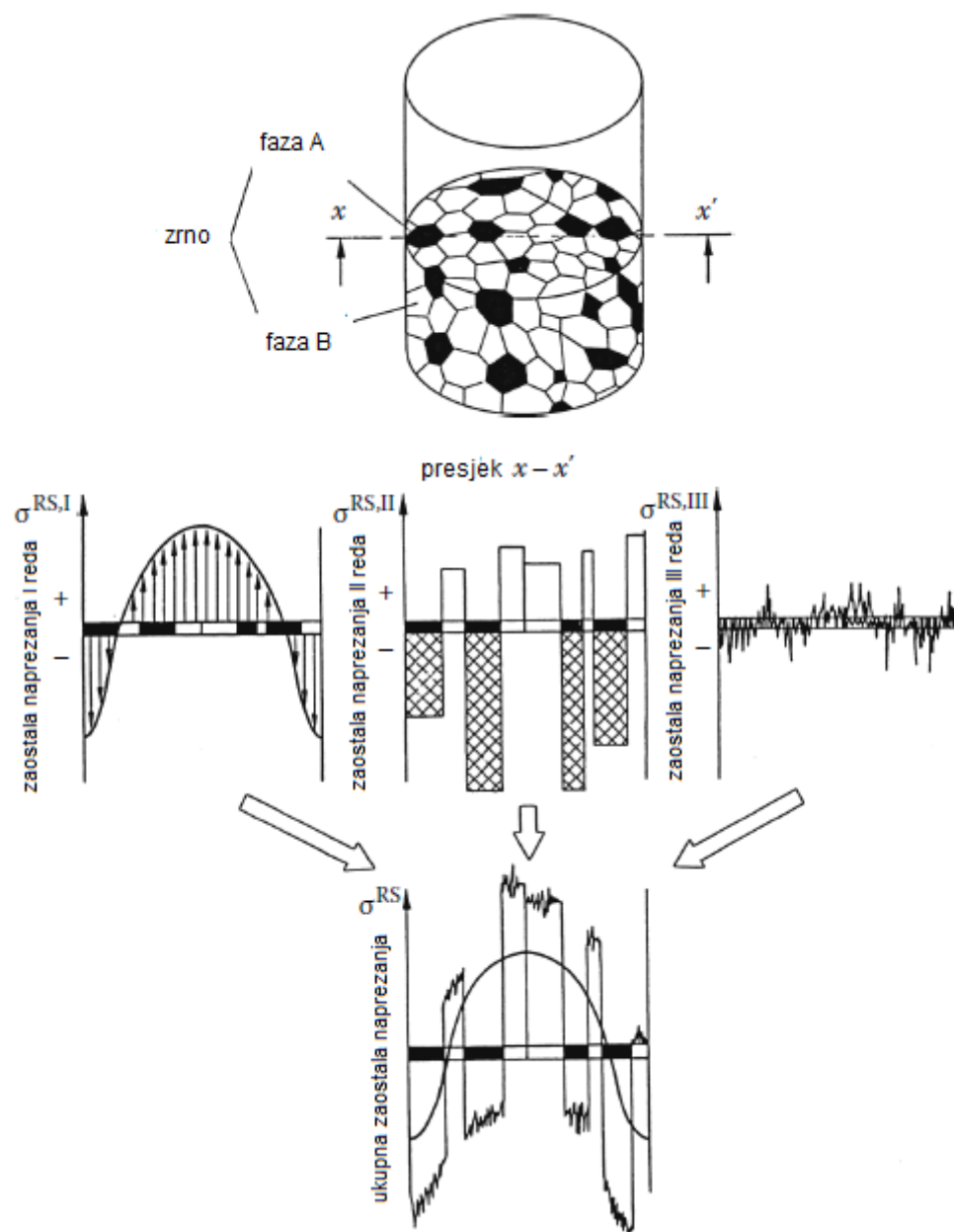
Zaostala naprezanja su mikro i makro naprezanja prisutna u predmetu (izratku, strojnom dijelu) bez djelovanja vanjskih sila i momenata u tom času, a nalaze se u mehaničkoj ravnoteži. U cilju prikladnog sustava označavanja, klasificirane su tri različite vrste zaostalih naprezanja pod pretpostavkom da im je konstantne amplitude i smjera.

- Zaostala naprezanja prvog reda σ^{RSI} prisutna su u većem području predmeta, odnosno protežu se preko većeg broja kristalnih zrna. Pripadajuće sile i momenti, nalaze se u ravnoteži u čitavom predmetu. Narušavanjem ravnoteže sila ili momenata nastaju makroskopske promjene dimenzija (izvitoperenja). Zaostala naprezanja prvog reda nazivaju se i makro zaostalim naprezanjima.

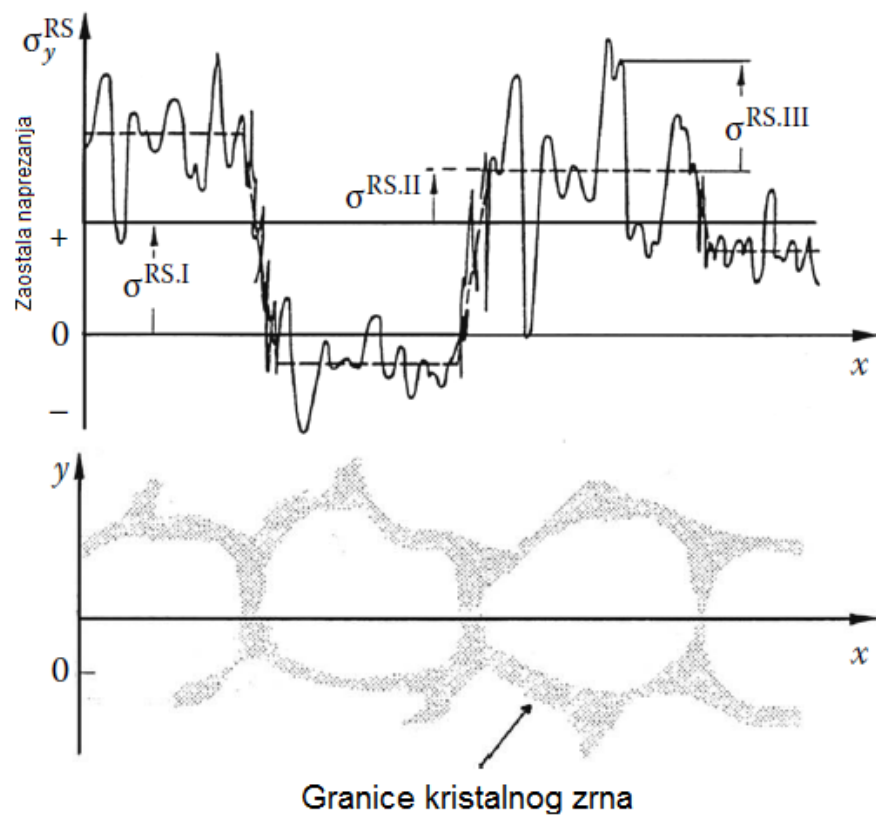
- Zaostala naprezanja drugog reda σ^{RSII} imaju konstantan iznos unutar jednog ili nekoliko kristalnih zrna. U ravnoteži se nalaze sile i momenti, manjeg broja susjednih kristala. Poremećajem ravnotežnih sila ili momenata mogu se pojaviti makroskopske promjene dimenzija. Zaostala naprezanja drugog reda pripadaju skupini mikro zaostalih naprezanja.
- Zaostala naprezanja treće vrste σ^{RSIII} razlikuju se već u nekoliko atomskih razmaka u kristalnoj rešetki, a odgovarajuće sile odnosno momenti, nalaze se u ravnoteži samo unutar djelića kristalnog zrna. Narušavanjem ravnoteže sila i momenata u ovom slučaju ne mogu nastupiti makroskopske promjene dimenzija. Zaostala naprezanja trećeg reda nazivaju se i mikro zaostalim naprezanjima.

Ove definicije opisuju sve razine zaostalih naprezanja koje nastaju u praksi. Superponiranjem zaostalih naprezanja prve, druge i treće vrste određuje se ukupno stanje zaostalih naprezanja koja djeluju lokalno u danom stanju materijala.

Tipičan primjer dan je na slici 10. Razmatran je cilindričan dvofazni materijal, u kojemu stabilne faze A i B posjeduju različite koeficijente toplinskog širenja. Stanje cilindra bez naprezanja je pretpostavljeno na dovoljno visokim temperaturama. Gašenjem sa te temperature na sobnu temperaturu, makro zaostala naprezanja prve vrste se razvijaju kao posljedica toplinskih naprezanja induciranih duž poprečnog presjeka cilindra. Longitudinalna naprezanja, koja egzistiraju duž presjeka ravnine x-x' okomito na os cilindra, prikazana su na lijevo, u sredini slike 10. Dijagramom u sredini slike 10 shematski su prikazana zaostala naprezanja drugog reda inducirana različitim magnitudama toplinskih naprezanja u kristalnim zrnima obje faze nakon što izjednačenja temperature. Iznosi ovih naprezanja proporcionalno rastu s porastom temperaturnog intervala kroz gašenja. Nadalje, svi tipovi nesavršenosti kristalne rešetke koji čine kristalna zrna dvaju mikrostrukturnih faza, dislokacije ili atomi neotopljenih elemenata, uzrokuju zaostala naprezanja treće vrste, shematski prikazana na desnoj strani slike 10. Konačno, superpozicija svih vrsta zaostalih naprezanja rezultira zaostalim naprezanjem složene raspodjele shematski prikazane na samom dnu slike 10 i slikom 11.



Slika 10. Shematski prikaz zaostalih naprezanja u dvofaznom materijalu nakon gašenja [3]



Slika 11. Shematski prikaz definicije prvog, drugog i trećeg reda zaostalih naprezanja [3]

2.3. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja

Toplinska obrada u svrhu reduciranja zaostalih naprezanja se koristi za smanjenje naprezanja zarobljenih u mikrostrukturi nakon izrade obratka jednim ili više proizvodnih postupaka. Ova toplinska obrada obuhvaća jednolično ugrijavanje obratka (ili samo dijela njegove površine) na temperaturu žarenja, u pravilu nižu od temperature mikrostrukturnih pretvorbi (temperatura A_{C1} za čelike), držanje na ovoj temperaturi određeno vrijeme i jednolično hlađenje do sobne temperature. Ako brzina hlađenja nije jednolična mogu nastati nova zaostala naprezanja jednaka ili čak veća od prvobitnih zaostalih naprezanja. Relaksacija naprezanja uključuje mikroskopska puzanja. Rezultat će ovisiti o vremenu i o temperaturi kao što je iskazano parametrom popuštanja:

$$P = T (C + \lg t) \quad (14)$$

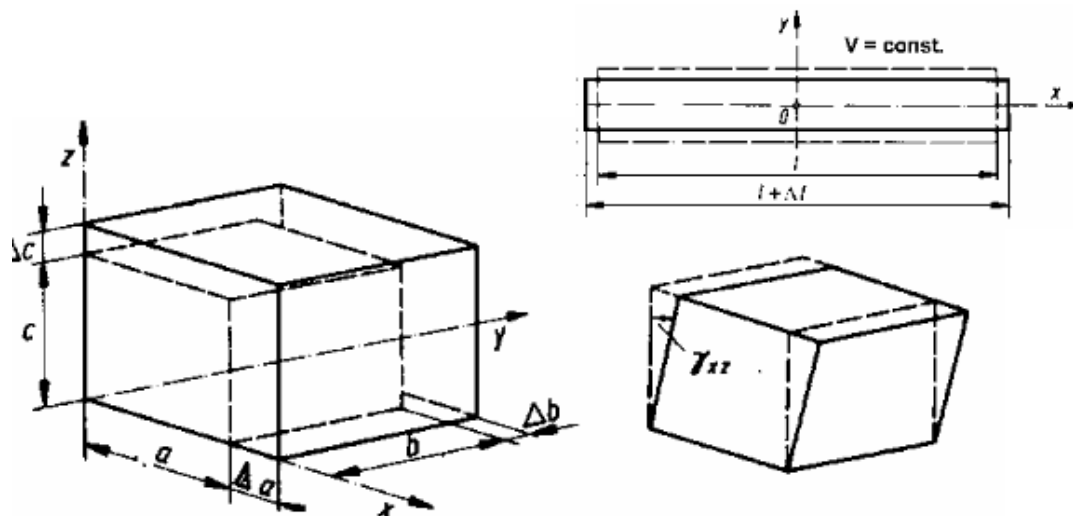
Oslobađanje zaostalih naprezanja žarenjem mogu se smanjiti deformacije i nastala visoka naprezanja, na primjer, nakon zavarivanja. Prisutnost zaostalih naprezanja može dovesti do loma uslijed napetosne korozije u blizini zavara i u područjima zavarene konstrukcije koja su bila hladno deformirana tijekom procesa izrade. Naposljetku, hladna deformacija može smanjiti granicu tečenja na povišenim temperaturama. Zaostala naprezanja u feritnim čelicima uzrokuju značajno smanjenje otpora na krhki lom. U materijalima koji nisu skloni krhkom lomu, kao što je austenitni nehrđajući čelik, zaostala naprezanja mogu biti dovoljna za pojavu napetosne korozije, čak i u naizgled bezopasnim uvjetima.

3. TOPLINSKE DEFORMACIJE

3.1. Nastanak deformacija u postupcima toplinske obrade

Uzorci promjene oblika i mjera obratka tijekom toplinske obrade jesu u slijedećim pojavama:

- Zaostala naprezanja uzrokuju promjenu oblika kada se prekorači vrijednost granice razvlačenja materijala R_e . To se može pojaviti pri grijanju kada se granica tečenja materijala snižava. Ako obradak ima zarobljena zaostala naprezanja (veća od granice razvlačenja materijala R_e), ona se mogu osloboditi tijekom grijanja do iznosa R_e . Inicijalne promjene oblika su elastične ali povećanjem naprezanja ulaze u područje plastične deformacije i takve promjene postaju trajne. Pri ugrijavanju naprezanja postupno bivaju oslobođena promjenom oblika obratka procesom plastičnog tečenja.
- Naprezanja izazvana razlikama u koeficijentu toplinske dilatacije i pojavom temperaturnih gradijenata. Ova naprezanja će rasti s povećanjem temperaturnog gradijenta i izazvat će plastičnu deformaciju ukoliko se prekorači granica razvlačenja. Uslijed toplinskih naprezanja ali i pogrešnog položaja obratka u peći, ili pogrešnim šaržiranjem, nastaju deformacije oblika i različita iskrivljenja, koja se na sreću mogu izbjeći racionalnim i promišljenim vođenjem proizvodnog procesa.
- Promjena volumena zbog transformacije mikrostrukturnih faza tzv. dilatacije su neizbježne deformacije. Ova promjena volumena uzrokuje transformacijska zaostala naprezanja dok se god ne prekorači granica razvlačenja, kada nastupa transformacijska plastična deformacija. U ovom radu neće se promatrati deformacije uzrokovane transformacijom mikrostrukturnih faza.



Slika 12. Deformacije volumena -lijevo, deformacije oblika –desno [5]

Porast deformacije oblika tijekom toplinske obrade očituje se kao plastično tečenje materijala nastalo pri grijanju ili hlađenju. Faktori koji utječu na iznos deformacije pri toplinskoj obradi su veličina i oblik obratka, temperaturni gradijent, brzina grijanja ili hlađenja itd. Kada se dijelovi zagrijevaju pri procesu toplinske obrade, po presjeku komponente javlja se temperaturni gradijent kao razlika temperature ruba i jezgre. Ako je presjek ugrijan tako da dio komponente je topliji nego okolni materijal, toplije ugriyani materijal expandira i zauzima veći volumen nego obližnji materijal zbog čega će nastalo naprezanje izazvati promjenu oblika obratka ako naprezanja prekorače čvrstoću materijala. Ovakva kretanja materijala mogu biti uzrokovane brzinom ugrijavanja i različitim debljina stijenke obratka.

Deformacije nastale toplinskim naprezanjima su u pravilu pravilne u simetričnim obradcima jednolične debljine. Kada se čelik grije ili hladi razvijaju se tlačna i torzijska naprezanja zbog razlika u temperaturi jezgre i površine. Ova naprezanja uglavnom induciraju promjene u veličini, i mora se naglasiti da im se rijetko kada pridaje pažnja pri procjeni dimenzijske stabilnosti. Mora se napraviti razlika između toplinskih naprezanja koja su oslobođena tijekom hlađenja u plastičnom području (koje je odgovorno za deformaciju), i naprezanja koja ostaju u materijalu, ali su od sekundarne važnosti za izazivanje promjena oblika. Glavno pravilo jest da su sva tijela različita od kugle sklona u procesima deformaciji težiti obliku kugle. Kocka ugljičnog čelika sa 0,10% ugljika će, nakon ponavljanja grijanja i neposrednog

hlađenja, dovesti do sfernog iskrivljenja stranica. Čak i obratci većih dimenzija će se deformirati u istom smjeru. U pravilu, što je intenzivnije hlađenje, veća je dubina deformiranog rubnog sloja. Deformacije su veće što je veća razlika u temperaturi između površine i jezgre, tj. što je viši intenzitet gašenja, veći presjek radnog komada i što su manje toplinska vodljivost i otpornost materijala visokim temperaturama.

Stupanj toplinskog naprezanja (i deformacije) ne ovisi samo o brzini hlađenja, nego i o temperaturnoj razlici između čelika i okolišnjeg medija. Porast radne temperature postupka toplinske obrade, izaziva porast toplinskog naprezanja i toplinskih deformacija.

3.2. Utjecajni čimbenici na pojavu deformacija

Uzroci deformacije obradaka od čelika mogu se razmatrati kroz pet odvojenih razina u proizvodnji i izvođenju postupaka toplinske obrade:

- stanja koja prethode toplinskoj obradi,
- stanja koja nastaju tijekom zagrijavanja pri toplinskoj obradi,
- stanja na samoj temperaturi obrade, npr. tijekom nitriranja, i dr.,
- stanja koja nastaju tijekom gašenja i hlađenja,
- stanja koja nastaju u procesima nakon gašenja.

Čimbenici proizvodnje i konstruiranja utjecajni na pojavu deformacija prije postupka toplinske obrade jesu sljedeći:

- svojstva materijala ,
- homogena svojstva duž poprečnog presjeka materijala,
- magnituda i distribucija sustava zaostalih naprezanja,
- geometrija izratka.

3.2.1. Svojstva materijala

Svojstva materijala utječu na pojavu deformacije na nekoliko načina. Svojstva koja utječu na čvrstoću materijala imaju značajan utjecaj na procese oslobađanja zaostalih naprezanja, kretanje materijala tijekom različitih toplinsko-vremenskih ciklusa i na zaostala naprezanja nakon gašenja. Kemijski sastav materijala je također povezan s očvrstljivosti materijala, na što upućuju fazne pretvorbe tijekom kaljenja. Specifikacije kemijskog sastava određuju udjele svakog legirnog i pratećeg elementa, ali svojstva materijala mogu varirati s obzirom na trenutni kemijski sastav, što u praksi znači, da svaka šarža u s različito reagira na pojavu zaostalih naprezanja i plastičnih deformacija.

3.2.2. Homogenost svojstava uzduž presjeka obratka

Prva varijabla koja se mora uzeti u razmatranje pojave zaostalih naprezanja i plastičnih deformacija je postupak proizvodnje čelika. Varijacije sastava duž poprečnog presjeka lijevanog ingota mogu uzrokovati različito ponašanje čelika tijekom toplinske obrade i varijacije u iznosu i raspodijeli zaostalih naprezanja. Varijacije u mikrostrukturi čelika mogu se djelomično otkloniti žarenjem ili nekim drugim procesom za oslobađanje naprezanja. Kako se ova toplinska obavlja na ogromnim šaržama, dolazi do varijabilnih rezultata od dijela do dijela šarže, što uzrokuje različito ponašanje čelika u sljedećim postupcima obrade. Čelik isporučen proizvođačima preciznih dijelova je uobičajeno kovanom ili valjanom obliku, načinjen od ingota ili kontinuirano lijevanog poluproizvoda. Pri valjanju ili kovanju, čelik je grije na 1050 do 1200°C i izlaže udarcima, tlačenju, valjanju da bi se izlomila ljevana struktura i postigla homogenost (kemijskog sastava i mikrostrukture) u poprečnim presjeku. Kako god, efekti prijašnjih postupaka nikad nisu u potpunosti iskorijenjeni i uzrokuju razlike u mehaničkim i ostalim svojstima, mikrostrukturi nakon toplinske obrade, kao i razlike u iznosu zaostalih naprezanja deformacija.

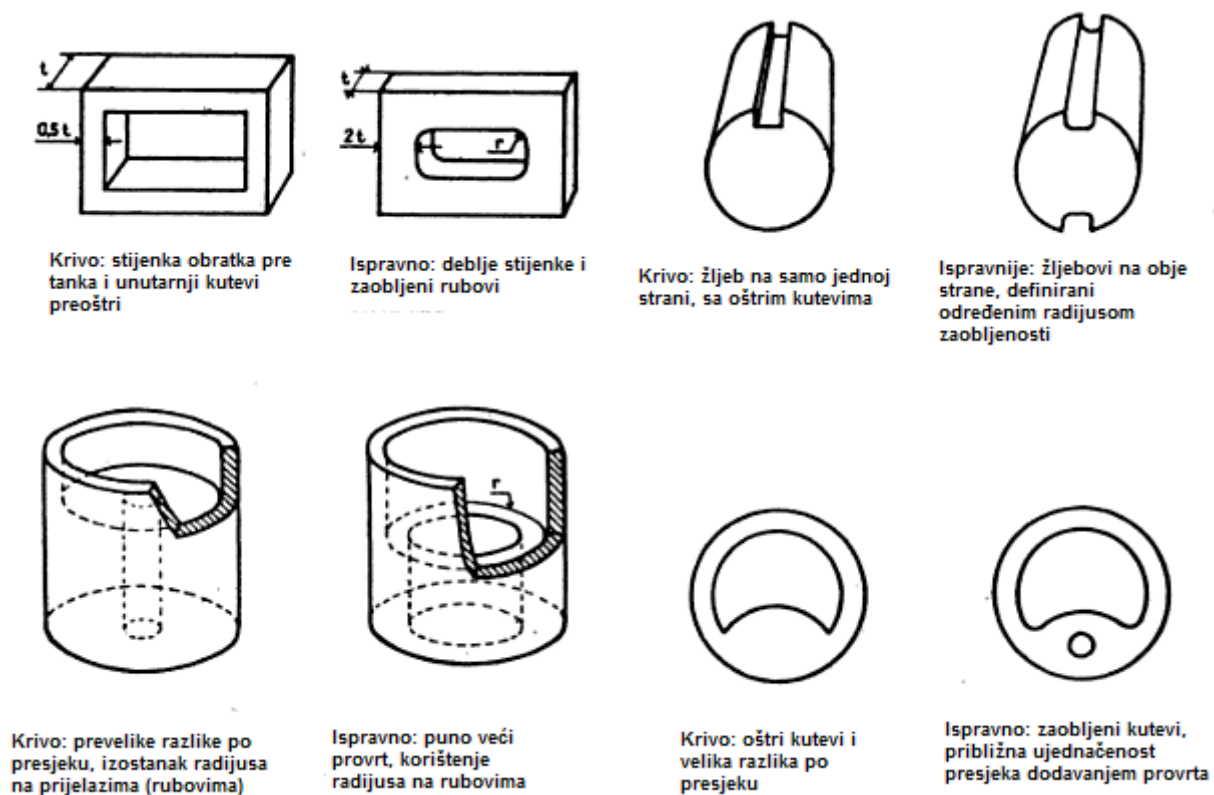
3.2.3. Magnituda i raspodijela zaostalih naprezanja

Ako je proizvođač čelika konzistentan, i ako je čelik podvrgnut proizvodnim postupcima uvijek na isti način, pojava zaostalih naprezanja i deformacija je prihvatljivo predvidljiva. Međutim, ako se čelik dobavlja iz različitih ljevaoničkih tržišta, naprava za valjanje, i ako se kuje s različitim rasporedom deformacijskih procesa i toplinski obrađuje u različitim pećima ili kupkama, pojava zaostalih naprezanja je promijenljiva, često bez jasnog objašnjenja. Većina čelika je valjana u toplom stanju, a nakon valjanja, dopušteno je hlađenje na zraku na toploj podlozi. To uzrokuje razliku u brzini hlađenja zbog provođenja topline od dna prema vrhu pločevine i konvekcijskog hlađenja gornjih ploča. Temperaturni gradijenti po presjeku pločevine stvorit će zaostala toplinska naprezanja i moguće očvrsnuće plastičnom deformacijom. Očvrsnuće može proizvesti visoku razinu zaostalih naprezanja, pa se mora izvršiti naknadni postupak oslobađanja naprezanja.

3.2.4. Geometrija izratka

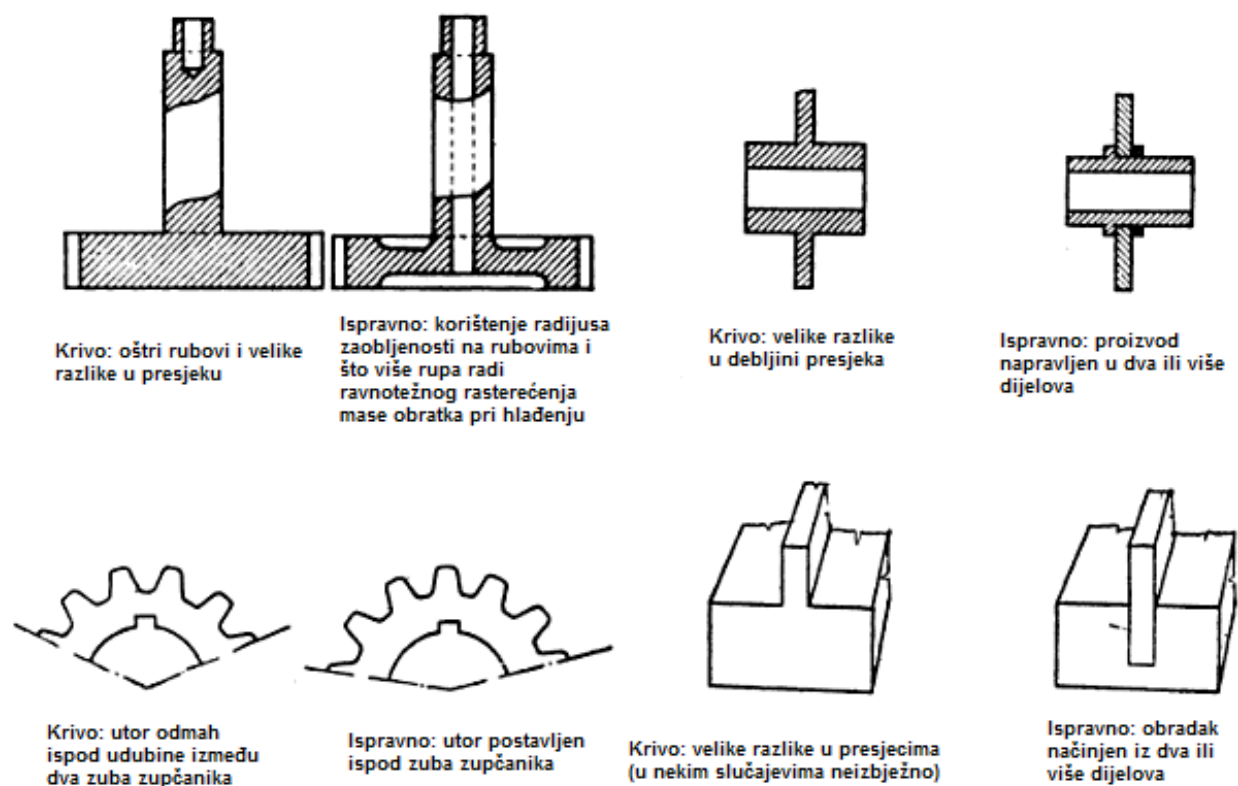
Promjena presjeka obratka čest je uzrok nejednoličnog grijanja i gašenja. Pri konstrukciji proizvoda, većina konstruktora prepoznaje potrebu za ujednačenjem veličina presjeka koliko god je to moguće, kako bi se smanjili temperaturni gradijenti tijekom postupka toplinske obrade i sklonost obratka nastajanju visokih iznosa zaostalih naprezanja. Ako je obradak karakterističnih značajki, kao što su zubi zupčanika, takva područja neizbježno će imati veće omjere površine prema volumenu u odnosu na ostale dijelove presjeka obratka. Stoga se zubi zupčanika često se izlažu bržem grijanju i hlađenju nego ostatak zupčanika. Kao rezultat toga, korijen zuba se ublažuje rubovima, i to područje podliježe sažimanju tijekom grijanja te pojavi vlačnih napetosti tijekom hlađenja. Slični efekti će se dogoditi u bilo kojim obradcima u kojima postoji promjene presjeka.

Većina grešaka očvrnutih obradaka događa se djelovanjem prednaprezanja i stvaranjem unutrašnjih naprezanja, uslijed gašenja. To može uslijediti i zbog neprikladnog oblika ili dimenzija obradaka za toplinsku obradu. Idealni oblik stvoren racionalnim dizajniranjem predstavlja dobro balansiranu raspodjelu mase unutar obratka, na način da je svaka točka površine primila i otpustila istu količinu topline, te tako procesi toplinske obrade simultano prožimaju cijeli volumen obratka. Pravilnim oblikovanjem obratka značajno se smanjuje rizik od deformacija i lomova, slika 13.



Slika 13. Prikaz nepravilnog i pravilnog oblikovanja obratka za toplinsku obradu [6]

Oštri unutarnji pregibi, oštri rubovi i kutovi trebaju se izbjegavati jer pokazuju razlike u brzini hlađenja različitih dijelova obratka, i takva mjesta postaju mjesta koncentracije naprezanja. U slučaju da se ne mogu izbjeći oštri rubovi zbog funkcije obratka, treba se na neki od mogućih konstrukcijskih načina osloboditi koncentracije naprezanja, slika 14.



Slika 14. Mogućnost rješavanja problema oštih rubova kao koncentratora naprezanja [6]

3.3. Deformacije pri grijanju obratka

Pojava deformacije tijekom grijanja inicirana je istovremenim djelovanjem slijedećih triju mehanizma:

1. Promjena oblika nastala oslobađanjem od zaostalih naprezanja
2. Promjena oblika nastala zbog toplinskih naprezanja i pojave plastičnog tečenja
3. Promjena volumena nastala tijekom mikrostrukturene fazne pretvorbe grijanjem

3.3.1. Promjena oblika nastala zbog oslobađanja zaostalih naprezanja

Prisutnost zaostalih naprezanja od primarnih operacija će uzrokovati promjene oblika ako su naprezanja oslobođena ugrijavanjem komponente u područje gdje se granica tečenja materijala snižava ispod razine zaostalih naprezanja u materijalu. Veličina ukupne plastične deformacije će ovisiti o magnitudi i raspodijeli polja naprezanja u obratku.

3.3.2. Promjena oblika nastala zbog toplinskih naprezanja i pojave plastičnog tečenja

Ako se obradak može zagrijati istom brzinom po čitavom volumenu, ekspandirat će jednoličnom brzinom ovisnom o koeficijentu toplinske ekspanzije, uz nepromijenjeni oblik. U svakodnevnoj praksi, ugrijavanjem obratka, površina se ugrijava brže i ekspandira ili teži zauzimanju većeg volumena nego hladnija jezgra obratka. Ekspanzija vanjskih slojeva obratka je ograničena hladnijom i čvršćom jezgrom. Tlačna naprezanja biti će prisutna u vanjskim slojevima pri grijanju, balansirana vlačnim naprezanjima u jezgri obratka. Štoviše, promjena oblika će nastupiti ako ova naprezanja izazovu plastičnu deformaciju kada se granica razvlačenja ugrijanog materijala snizi ispod razine ukupnog naprezanja u obratku. Stoga, promjena oblika ovisi o geometriji obratka, brzini ugrijavanja, koeficijentu toplinskog širenja, svojstvima materijala, i šaržiranju obratka u peći.

3.3.3. Promjena volumena nastala tijekom mikrostrukturne fazne pretvorbe grijanjem

Kada se čelik zagrijava s sobne temperature, toplinska ekspanzija kontinuirano raste do temperature A_{c1} . Prelaskom u područja temperatura iznad A_{c1} počinju transformacije mikrostrukturnih faza. Zadatak ovog rada ne obuhvaća područja temperatura iznad A_{c1} , odnosno 723°C , stoga se promjene volumena obratka uzrokovanih faznim transformacijama neće ovdje razmatrati.

3.4. Deformacije na zadanoj temperaturi obrade

Jednom zagrijani obratci držani na konstantnoj temperaturi obrade izloženi su slabije izraženim čimbenicima promjene oblika, a one puno veće promjene događaju se pri gašenju. Promjene oblika obratka od čelika nastale pri procesima obrade bez fazne transformacije odnosno pri temperaturama nižim od 723°C puno su privlačnije u istraživanju njihovih uzoraka, jer za razliku od promjena volumena mogu se uz puno truda i iskustva uspješno izbjeći ili bar minimizirati.

Na primjer kod postupka nitriranja, kod kojeg se iznad 590°C stvaraju krhki i neuporabljivi spojevi Fe-N, radna temperatura postupka niža je od 590°C . Prema tome u postupku nitriranja čelika neće biti mikrostrukturnih faznih pretvorbi (prekristalizacije), što omogućava obradu bez deformacija volumena. Ako su dijelovi bili u strojnoj obradi izvrnuti znatnom skidanju strugotine, velikoj promjeni presjeka, većem broju operacija obrade ili ravnanju, prije nitriranja obratke je obavezno odžariti za otklanjanje napetosti, na temperaturi između 500 do 600°C . Na taj način mogu se otkloniti uzroci eventualnih deformacija prije završne strojne obradbe na mjeru i nitriranja. Kako se samo nitriranje provodi na relativno niskim temperaturama (490 - 560°C), dakle znatno ispod granice pretvorbe A_1 uz moguće sporije ohlađivanje s temperature nitriranja, ovim se postupkom dobivaju dijelovi praktično bez ikakvih deformacija, iskrivljenja i naprezanja. To je svakako jedna od najvećih praktičnih prednosti nitriranja, i razlog da se ovaj postupak upotrebljava za dijelove i alate osjetljive na deformacije.

3.4. Deformacije gašenja obratka

Od svih faza postupka toplinske obrade, gašenje je jedna od najutjecajnijih na pojavu deformacija, lomova, i zaostalih naprezanja. Iako se lomovi uslijed gašenja mogu eliminirati, to ne vrijedi za deformacije nastale gašenjem. Zbog toga se uobičajeno rješava problem kontrole deformacija, ne njihova potpuna eliminacija. Jedan oblik deformacije koji se može pojaviti tijekom gašenja je definiran kao deformacija oblika poput savijanja, izvijanja ili uvijanja. Drugi pojavni oblik deformacija su promjene dimenzije vidljive kao istežanje, stežanje, zadebljanje, ili stanjenje obratka.

Deformacije koje se javljaju tijekom gašenja povezane su sa sljedećim utjecajnim čimbenicima:

- Krivuljom hlađenja sredstva za gašenje,
- Jednoličnošću gašenja,
- Veličinom i oblikom obratka,
- Stanjem površine obratka,
- Izborom čelika.

Gašenje čelika treba provesti brzinama većim ili jednakim gornjoj kritičnoj brzini gašenja. Istodobno, pojava deformacije i loma mora se minimizirati. Ipak, često puta su to kontradiktorne težnje. Na primjer, iako se povećanjem brzine hlađenja povećava se tvrdoća, istovremeno se povećava i sklonost nastanku deformacije, naprezanja i loma. Isto tako, deformacija i naprezanja nastala tijekom gašenja su pod utjecajem mnogih čimbenika, kao što su sredstvo za gašenje, temperatura kupke, i gibanje sredstva za gašenje. Dimenzije, oblik, materijal obratka također utječu na pojavu deformacija, naprezanja i loma.

3.4.1. Sredstvo za gašenje

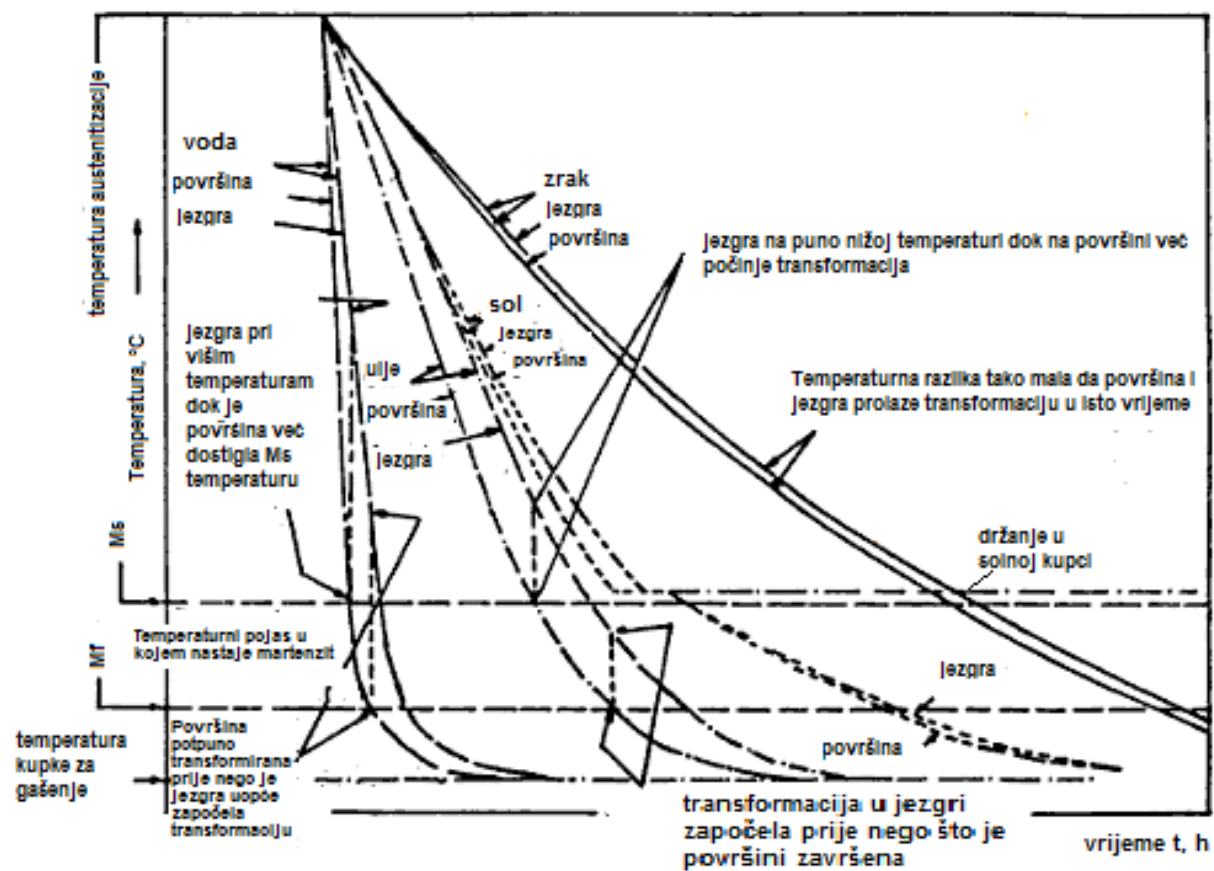
Izbor sredstva za gašenje je osnovni čimbenik koji utječe na procese hlađenja obratka. Stoga, je upravo to temelj za razmatranje kontrole naprezanja i deformacije tijekom gašenja. Izbor prikladnog sredstva za gašenje ovisi o intenzitetu gašenja koji se želi postići. Na primjer, voda, slana voda ili niže koncentracije polimernih vodenih otopina koriste se za čiste ugljične

čelike. Ulja za ubrzavanje koriste se za nisko legirane čelike. Konvencionalna ulja visokih koncentracija polimera koriste se za visoko legirane čelike.

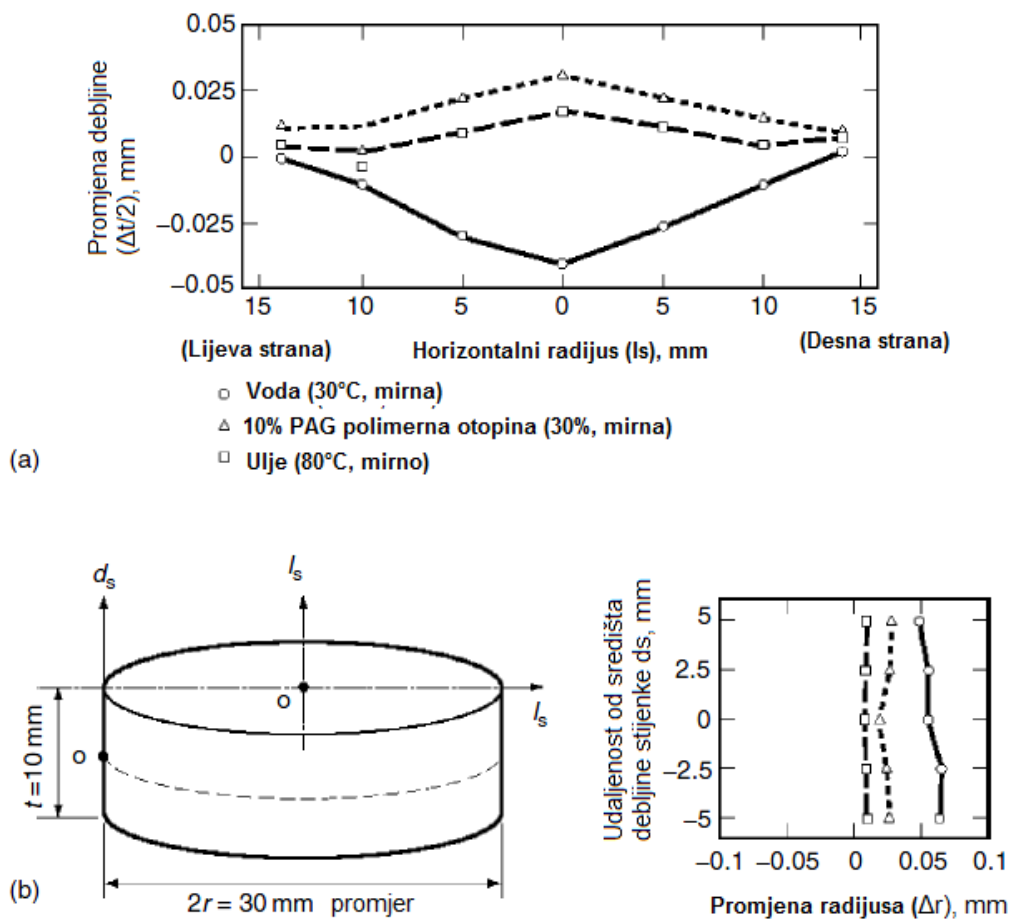
Dimenzije i oblik kaljenog obratka također se uzimaju u obzir pri izboru sredstva za gašenje. Općenito, što je obradak deblji, izabire se oštrije sredstvo za gašenje. No, oštrije sredstvo za gašenje gotovo uvijek povisuje naprezanja i deformacije gašenog obratka. Za obratke od čelika sa kombinacijom debljeg i tanjeg poprečnog presjeka, odabir sredstva za gašenje je puno kompleksniji. Mnogi takve situacije povećavaju neuniformnost hlađenja, a time povećavaju potencijal naprezanja, lomova i deformacija.

Pojava kvašenja tijekom gašenja u sredstvima za gašenje koja su isparljiva, kao što je voda, ulje, ili vodene otopine polimera, rezultiraju nejednoličnim hlađenjem obradaka stvarajući visoke temperaturne gradijente i gotovo uvijek povisuju distorziju i naprezanja. Većina polimernih vodenih otopina kao sredstva za gašenje pružaju nejednolična svojstva kvašenja, što omogućuje značajnu redukciju lomova i deformacija. Gašenje u solnim kupkama i rastaljenim metalima također pridonosi jednoličnom gašenju, smanjujući brzinu hlađenja, i nejednoličnost temperature čeličnog obratka zbog visoke temperature sredstva za gašenje. Ove karakteristike utječu na redukciju naprezanja, deformacije i lomova.

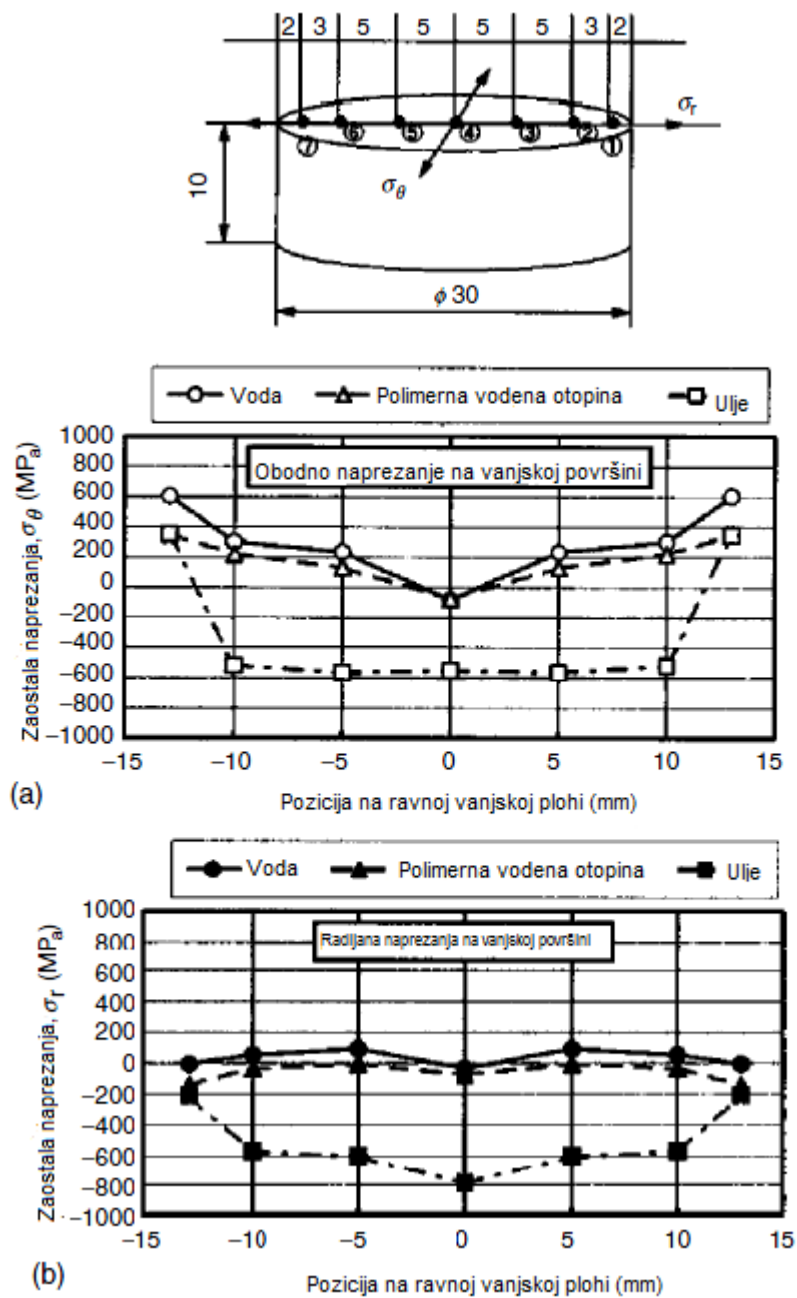
Slika 15 prikazuje deformacije i zaostala naprezanja čeličnog diska promjera 30mm i debljine 10mm, gašenog u različitim sredstvima za gašenje bez strujanja sredstva, pri čemu su uočene različite raspodjele naprezanja i deformacije za svako sredstvo za gašenje. To je rezultat razlike u snazi hlađenja pojedinog sredstva, koja je izražena krivuljama hlađenja u kontinuiranom dijagramu hlađenja (TTT ili eng.continuous cooling transformation curve CCT). Proces kvašenja površine uzorka tijekom gašenja u vodi, polimeru ili ulju također utječe na naprezanja i distorziju. Pri stvaranju parnog omotača tijekom hlađenja, kolaps parnog omotača (tj. kvašenje) progresivno djeluje tijekom gašenja u vodi. To rezultira neuniformnim hlađenjem čeličnog uzorka i povećanjem naprezanja i deformacije. Stoga, ako parni omotač doživi lom simultano ili eksplozivno, kao što se događa pri gašenju u polimernoj vodenoj otopini, tada simultani kolaps omogućava uniformno gašenje što je od značaja u reduciranju naprezanja i deformacije. Slike 16 i 17 ilustriraju utjecaje na uniformno gašenje primjenom polimernog sredstva za gašenje. Uobičajeno, što je veća intenzivnost gašenja sredstva za gašenje, veća je opasnost od distorzija i lomova. To najčešće rezultira povećanjem toplinskih naprezanja, ali ne transformacijskih naprezanja.



Slika 15. Primjer distribucije topline pri odabiru različitog sredstva za hlađenje [7]



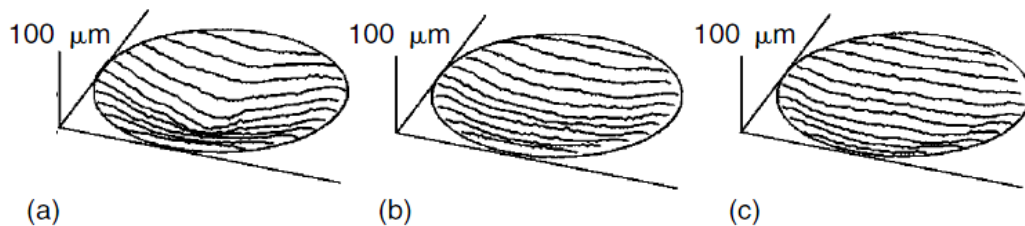
Slika 16. Utjecaj medija za gašenje na distorziju pri hlađenju JIS S45C ugljičnog čeličnog diska gašenog u mirnom mediju. Dimenzije uzorka bile su 30mm promjer i debljina 10mm. (a) Distribucija deformacije u aksijalnom smjeru. (b) Distribucija deformacije u radijalnom smjeru [7]



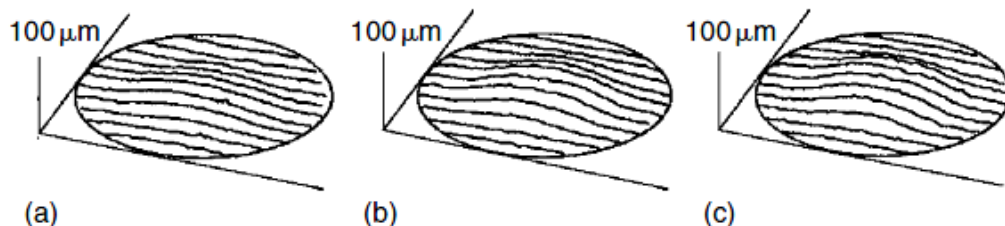
Slika 17. Utjecaj sredstva za gašenje na zaostala naprezanja bočnu površinu diska od JIS S45C ugljičnog čelika gašenog u mirnom mediju. Dimenzije uzorka su 30mm promjer, i 10mm debljina. (a) Obodno naprezanje na vanjskoj površini. (b) Radijalno naprezanje na vanjskoj površini [7]

3.4.2. Strujanje sredstva za gašenje

Neuniformnost gašenja može porasti od neujednačenih polja brzina strujanja sredstva za gašenje uz površinu do neujednačenog kvašenja površine obratka. Dodatno, neprikladan smjer i brzina strujanja predstavlja veliki izvor neujednačenosti gašenja. Gibanjem sredstva za gašenje želi se osigurati ne samo veći intenzitet gašenja nego i ujednačeno hlađenje kako bi se suzbila prekomjerna deformacija i naprezanja obratka. Slika 18 pokazuje utjecaj strujanja sredstva za gašenje na profil ravne površine čeličnog diska. Shema pokazuje neujednačeno hlađenu površinu čeličnog diska nakon gašenja u mirnoj vodi s pojavom konkavnosti površine. Primjenom vode sa strujanjem značajno se smanjuje deformacija nakon gašenja. To se događa zato što gibanje obratka u rashladnom mediju smanjuje neujednačenost hlađenja površine diska i ubrzava propagaciju kolapsa parnog omotača na površini. Ipak, gibanje obratka u vodenoj otopini polimera ne smanjuje distorziju tijekom gašenja zbog brzog i eksplozivnog stvaranja parnog omotača koji nastaje uz prisutnost strujanja ali i bez njega (vidi sliku 19).



Slika 18. Utjecaj agitacije u vodi na nastajanje deformacije prilikom gašenja JIS S45C ugljičnog čeličnog diska. Dimenzije uzorka su 30mm promjer, 10mm debljina. Rashladni medij je gradska voda 30°C. Brzina strujanja: (a) mirna voda, (b) 0.3 m/s, i (c) 0.7 m/s. [7]



Slika 19. Utjecaj agitacije u polimernom sredstvu za hlađenje na nastajanje deformacije prilikom gašenja JIS S45C diska od ugljičnog čelika. Dimenzije uzorka 30mm promjer, 10mm debljina. Rashladni medij je 10% polimer (PAG) temperature 30°C. Brzina strujanja: (a) mirna voda, (b) 0.3 m/s, i (c) 0.7 m/s. [7]

3.4.3. Utjecaj veličine obratka

Brzina hlađenja gašenog obratka može se staviti u kontekst inverznog odnosa s povećanjem debljine obratka zbog efekta mase. Naime, brzine hlađenja jezgre su ograničene difuzijom topline u sam obradak. Stoga, naprezanja i deformacije tijekom gašenja su izazvane dimenzijom, oblikom i materijalom kaljenog obratka.

3.4.4. Utjecaj stanja površine obratka

3.4.4.1. Utjecaj površinske hrapavosti

Tekstura i hrapavost površine čine važne čimbenike lomu uslijed gašenja zbog toga što mikroskopska geometrije i hrapavost površine utječu na tendenciju lomova. Narazaki i ostali, istraživali su upravo ove utjecaje, a rezultati istraživanja pokazuju sljedeće:

- Površinska hrapavost povećava tendenciju lomova čelika pri gašenju ako je hrapavost (maksimalna visina neravnine R_y , ili deset puta uvećana visina nepravilnost R_z) veća od približno $1\mu\text{m}$.
- Tekstura površine nastala laganim udarcima, sklona je povisiti pojavu lomova uslijed gašenja, prilikom brušenja ili poliranja kada je hrapavost površine približno jednaka.

Ova fenomen nastaje većinom zbog koncentracije naprezanja na površini obratka. Geometrijski oblici na površini kao što su tragovi poliranja, otisci laganih udaraca, tragovi brušenja, tragovi reznog alata, i mikrozarezi kao mjesta koncentracije naprezanja, aktiviraju inicijanu pukotinu loma pri gašenju.

3.4.4.2. Utjecaj oksida ili prevučenih slojeva

Prisutnost tankog sloja kao što je oksidni sloj ili prevlake može uzrokovati efekt ubrzanja hlađenja sprječavajući formiranje parnog omotača ili ubrzanje loma parnog omotača. Stoga, prisutnost sloja oksida ili različitih prevlaka u velikoj mjeri se sprječava nastajanje lomova uslijed gašenja. Ipak, debeli oksidni slojevi na obradcima od čelika ponekad uzrokuju nestabilno hlađenje i razugljičavanje.

3.5. Minimizacija deformacija u postupcima toplinske obrade

Jedan od uzroka neprihvatljive deformacije i lomova jeste konstrukcija čeličnih obradaka. Neprikladna konstrukcija obratka pospješuje nastajanje deformacije i lomova ističući neujednačenost i nesimetričnost prijenosa topline tijekom gašenja. Osnovni princip uspješnog dizajniranja je odabir oblika koji minimizira temperaturni gradijent duž obratka tijekom hlađenja. Načela konstrukcije kaljenih obradaka kojima se minimiziraju distorzije i lomovi jesu sljedeća:

- Simetrija: Važno je osigurati što bolju simetriju. Jedna od tehnika kojima se to postiže je dodavanje dodatnih rupa, utora, ili sličnih oblika na obratcima od čelika.
- Balansiranje površine poprečnog presjeka: razlika između velikih i tankih presjeka treba se smanjiti koristeći pritom nekoliko tehnika:
 - Izbjegavanje oštih prijelaza tijekom promjena veličina poprečnog presjeka koristeći velike radijuse zaobljenosti;
 - Dodavanje dodatnih rupa na područjima velikih presjeka;
 - Mijenjanje slijepih rupa sa rupama izbušenim do kraja;
 - Mijenjanje debelih krutih oblika s tanjim oblicima šupljina;
 - Dijeljenje kompleksnih oblika na pojedinačne komponente.
- Izbjegavanje oštih rubova i kutova: Kada se analiziraju deformacije i lomovi pri gašenju dijelova sa oštrim rubovima i kutovima tada se s obzirom na takvu geometriju govori o povećavanju neujednačenosti gašenja gdje takva mjesta bivaju koncentratori naprezanja.

3.5.1. Optimalan izbor čelika

Iako deformacija i lomovi prilikom hlađenja najčešće nastaju zbog neujednačenog hlađenja, ipak odabir materijala može biti ključan faktor. Pažnju treba posvetiti pri izboru materijala:

- Tolerancija sastava mora se provjeriti kako bi se sa sigurnošću potvrdilo sastav legure u specifikaciji proizvođača
- Najčešće je bolje uzeti nisko ugljični čelik, visok sadržaj ugljika često izaziva veliku osjetljivost na distorziju i lomove
- Ako je moguće, dobro je izabrati visoko legiran čelik i vrlo sporo hlađenje. Međutim, izbor visokolegiranog čelika značajno povišuje cijenu materijala.

3.5.2. Optimalna konstrukcija obratka

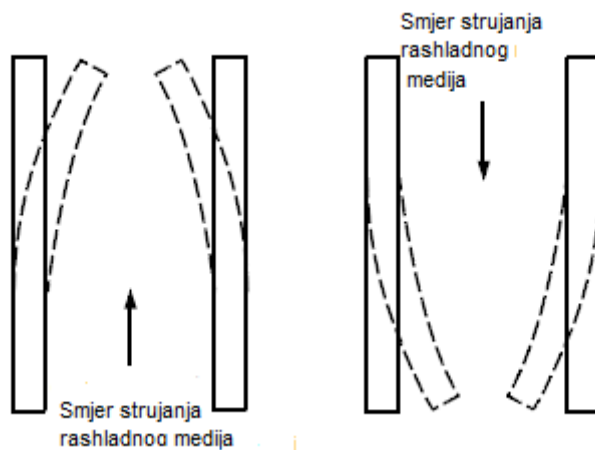
3.5.3. Ispravna provedba toplinske obrade

Može se reći da nejednoličnost gašenja najviše pridonosi nastanku deformacija i lomova tijekom gašenja. Neujednačeno gašenje pojavljuje se s neujednačenim strujanjem po površinama obratka ili s neujednačenim kvašenjem površine. Oboje rezultira neujednačenim prijenosom topline tijekom gašenja koje stvara velike toplinske gradijente između jezgre i površine obratka ili duž same površine obratka.

Neprikladan postupak regulacije strujanja medija za gašenje postaje glavni izvor neujednačenosti prilikom gašenja. Zadaća sustava strujanja nije samo odvođenje ugrijanog sredstva za gašenje s površine obratka u izmjenjivač topline nego isto tako i ostvarivanje ujednačenog odvođenja topline duž cijele hladene površine svih obradaka koji se istovremeno obrađuju u šarži.

U sustavu gašenja gdje postoji vertikalno strujanje rashladnog medija na šaržu postavljenih obradaka, donje površine obradaka izložene su većem utjecaju strujanja nego gornje površine. Strujanje proizvodi veće odvođenje topline na donjoj površini, stvarajući velike toplinske gradijente između gornjih i donjih površina.

Na slici 20 prikazan je utjecaj smjera strujanja na nastanak deformacija za slučaj kad je strujanje sredstva za gašenje u istom smjeru kao smjer uranjanja obratka ili u suprotnom smjeru. Rješenje ovog problema je u minimiziranju strujanja rashladnog medija kako bi odgovaralo adekvatnom prijenosu topline tijekom gašenja a isto tako osiguravanje strujanja mehaničkim gibanjem obratka gore i dolje u rashladnom mediju. Identificiranje uzroka neujednačenog strujanja fluida tijekom gašenja i dalje je važan konstrukcijski zadatak kojim se minimiziraju deformacije i pukotine gašenja.



Slika 20. Utjecaj strujanja rashladnog medija na smjer deformacije [8]

Neujednačeni toplinski gradijenti tijekom gašenja su također povezani s kinematikom kvašenja što je od posebnog značaja pri korištenju hlapljivih tekućih rashladnih medija u koje spadaju: voda, ulje, i polimerne vodene otopine. Većina tekućih sredstava za gašenje ima temperaturu ključanja između 100 i 300°C pri atmosferskom tlaku. Kada se obratci gasu u takvim fluidima, kvašenje površine je uobičajeno vremenski ovisno čime se utječe na proces hlađenja i postignutu tvrdoću.

Pri uranjanju prskalicama olakšava se ujednačeno odvođenje topline, stoga su sljedeći konstrukcijski pothvati preporučljivi:

- Cijela površina obratka trebala bi biti izložena ujednačenom djelovanju rashladnog medija
- Trebaju biti korištene dovoljno velike rupe i prikladan razmak između njih
- Vrh prskalice treba biti najmanje 13 mm od površine obratka koji se gasi
- Treba se omogućiti ponovljivost u odvođenju vrućeg rashladnog medija i pare

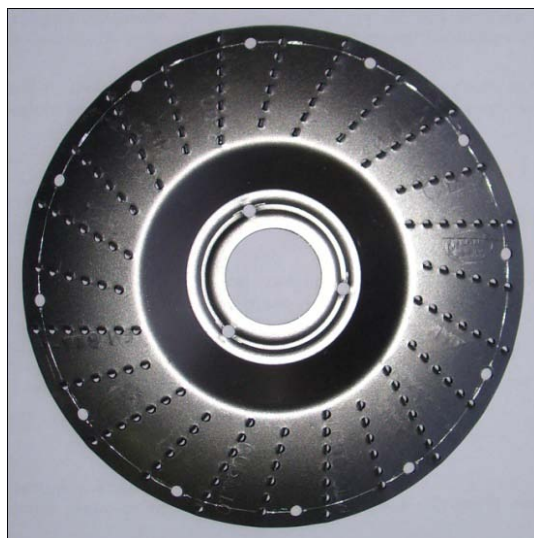
4. Priprema i provedba ispitivanja

4.1. Ispitni uzorak

Za pokuse ispitivanja utjecajnih čimbenika na pojavu deformacija pri toplinskoj obradi ispod transformacijske temperature A_1 , koristio se konkretan proizvod roto rašpa (slika 21) proizvođača "Roto Kruna d.o.o" iz Velike Gorice.

Roto rašpa (u daljnjem tekstu uzorak) je univerzalni alat za kutne brusilice namijenjen za obradu drveta, plastike, guma, umjetnih smola i ostalih "mekih" materijal, pa i za obradu bakra i aluminija. Roto rašpom omogućuje se obrada s većim učinkom u smislu količine odvojene čestice u jedinici vremena u odnosu na poznate alate za kutnu brusilicu. Montaža alata na kutnu brusilicu vrši se stezanjem za njenu osovinu preko originalne stezne pločice i matice od brusilice. Rotacijom alata na brusilici u rasponu od 1.500 do 11.000 okr./min ostvaruje se kinematika potrebna za rezanje materijala.

Sa stanovišta ispitivanja pojave toplinskih naprezanja i deformacija izabrani industrijski izrađeni alat, predstavlja proizvod u kojem se mogu pojaviti zaostala naprezanja nakon obrade deformacijom i koji svojim oblikom i konstrukcijom pokazuje sklonost toplinskim deformacijama. Na prikazanom obratku jednostavno je označiti mjerne točke (provrtne na obodu) i provesti mjerenja promjene udaljenosti između dva susjedna provrta. Time se stvarni 3D oblik rašpe zamjenjuje poligonom (dvanaestorokutom) s mjerenim stranicama.



Slika 21. Roto rašpa

4.1.1. Kemijski sastav ispitnog uzorka

Ispitni uzorci izrađeni su od hladno valjanog nelegiranog ugljičnog čelika oznake DC01 HRN EN 10130 . Vanjske mjere uzorka jesu slijedeće:

- vanjski promjer $\phi 116$ mm,
- promjer provrta za postavljanje na brusilicu $\phi 22$ mm,
- debljina lima 0.7 mm.

Konstrukcija i ostale mjere vidjeti na radioničkoj sastavnici u prilogu rada.

Tablica 1. Kemijski sastav ispitnih uzoraka

%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Al
0,074-	0,009-	0,224-	0.005-	0.010-	0,033-
0,096	0,018-	0.300	0,015	0,017	0,045

Tablica 2. Mehanička svojstva ispitnih uzoraka (zamijeniti mjesta Rm i Rp)

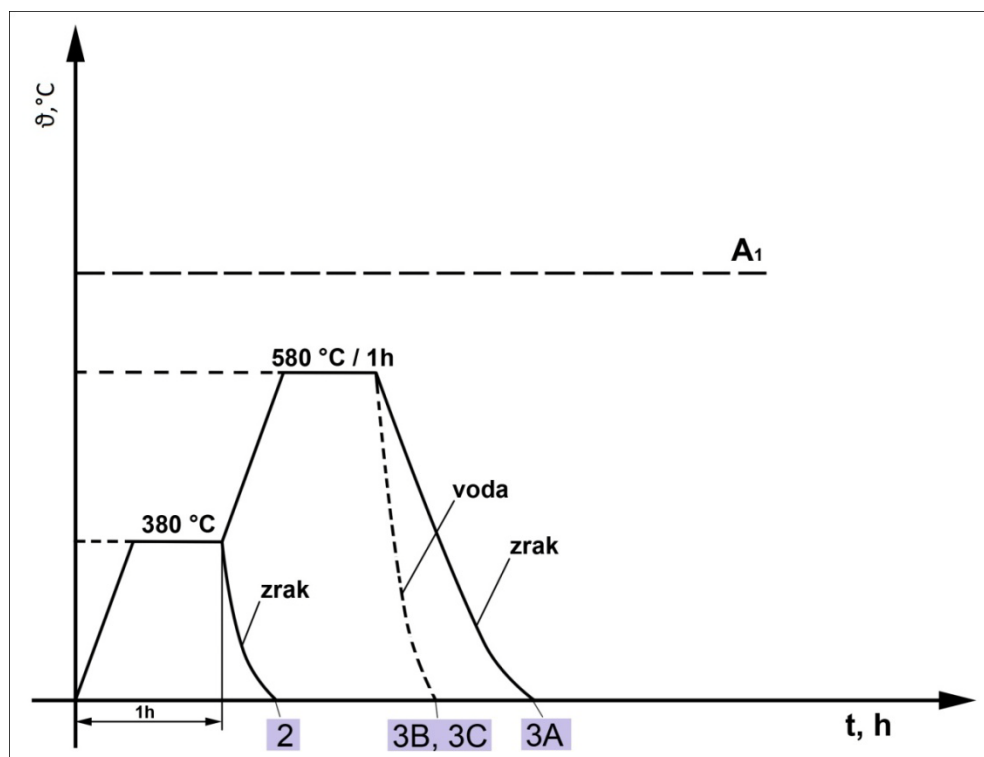
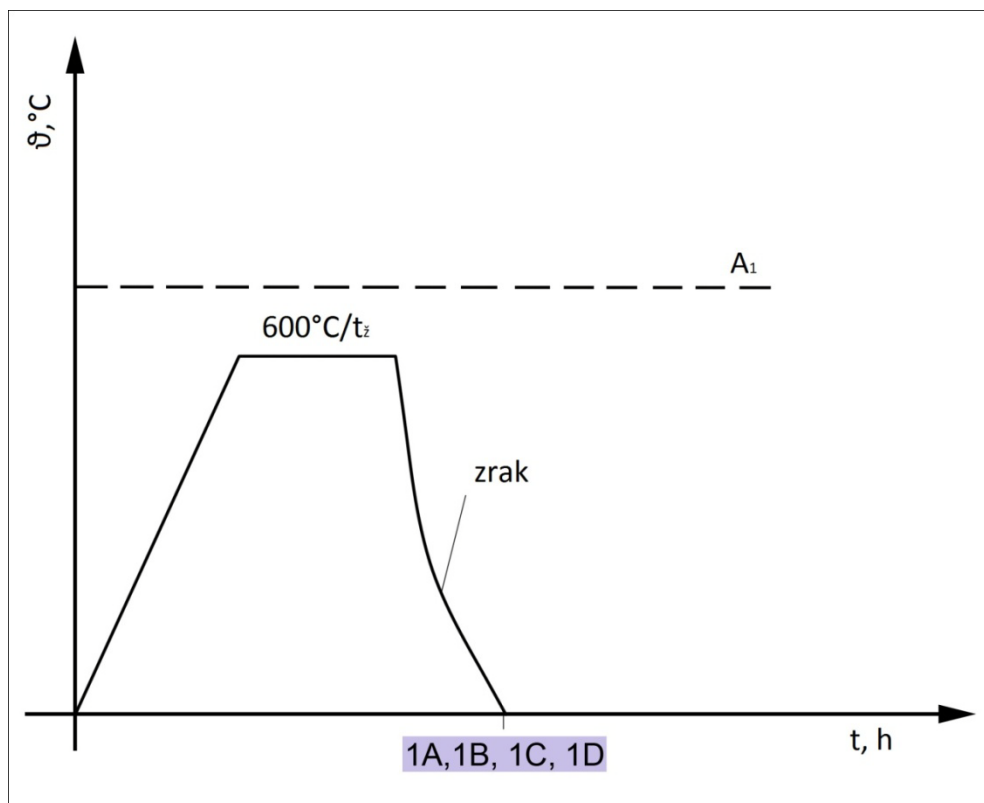
Rm (N/mm ²)	R _{p,0,2} (N/mm ²)	A _z (%) Lo = 80mm
341-352	246-252	31-33

4.2. Plan pokusa

Prije samog pristupa opisu pokusa, valja napomenuti da su uzorci prije ispitivanja bili u hladno deformiranom stanju bez prethodne toplinske obrade. Ispitni uzorci su slučajnim rasporedom grupirani u nekoliko skupina koje su označene oznakama od "1A" do "3C" a koje predstavljaju točno zadane režime žarenja. U svakoj skupini su za ispitivanja predviđena po tri uzorka koja su toplinski obrađeni u istoj šarži. Toplinskom obradom (žarenjem) ispitat će se utjecaj:

- temperature žarenja (380, 580, 600) °C,
- vremena žarenja (1, 2, 3 h),
- sredstva za hlađenje nakon žarenja (hlađenje na zraku ili u vodi),
- položaja ispitnih uzoraka tijekom hlađenja. (hlađenje u vertikalno ili horizontalnom položaju)

Dijagrami ispitivanih postupaka žarenja prikazani su na slici 22. Slika 22.a prikazuje dijagram postupka žarenja na temperaturi 600°C uz promjenu vremena držanja t_z za skupinu uzoraka pod oznakom "1A", "1B", "1C", "1D". Slika 22.b prikazuje dijagram postupka žarenja na temperaturi 380°C/1h uz sporo hlađenje na zraku prema kojemu je izložena serija uzoraka s oznakom 2. Serije uzoraka "3A", "3B", "3C" su nakon pregrijavanja na 380°C/1h, grijane na temperaturu žarenja 580°C/1h a potom hlađene u određenim položajima različitim rashladnim sredstvima. Parametri postupka za pojedinu skupinu uzoraka navedeni su u tablici 3.



Slika 22. Dijagrami plana postupaka toplinske obrade žarenja

Tablica 3. Parametri žarenja ispitnih uzoraka od čelika HRN EN 10130

Oznaka skupine ispitnih uzoraka	Parametri žarenja
1A	600 °C / 1h / zrak (↔)
1B	600 °C / 2h / zrak (↔)
1C	600 °C / 3h / zrak (↔)
1D	600 °C / 3h / zrak (↑)
2	380 °C / 1h / zrak (↔)
3A	380 °C / 1h / 580 °C / 1h/ zrak (↔)
3B	380 °C / 1h / 580 °C / 1h/ voda (↑)
3C	380 °C / 1h / 580 °C / 1h/ voda (↔)

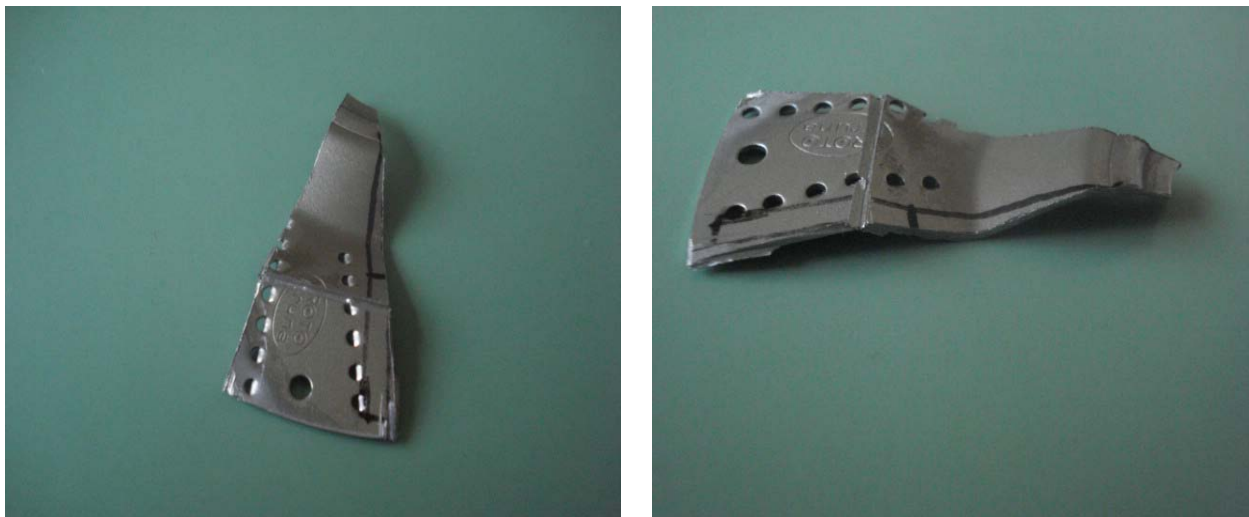
(↔) ... hlađenje ispitnog uzorka u horizontalnom položaju

(↑) ... hlađenje ispitnog uzorka u vertikalnom položaju

4.3. Priprema uzorka za metalografsku analizu i ispitivanje mikrotvrdoće

4.3.1. Uzorkovanje i zalijevanje u polimernu masu

Mikrostruktura ispitnih uzoraka analizirana je u polaznom stanju (toplinski neobrađenom) i nakon žarenja na $600^{\circ}\text{C}/3\text{h}/\text{zrak}$. ispitni uzorak za analizu polaznog stanja uzet je slučajnim izborom iz industrijski izrađene serije roto-rašpi i iz njega je izrezan isječak prikazan na slici 23. Tako Izrezani uzorak kapsuliran je polimernom (akrilnom) masom u standardni oblik kapsule prikladan za daljnje rukovanje pri mehaničkoj obradi željenog presjeka. Na isti način izrezan je i ispitni uzorak u žarenom stanju.



Slika 23. Isječak roto-rašpe za mikrostrukturnu analizu polaznog stanja

4.3.2. Brušenje metalografskih uzoraka

Brušenje metalografskih uzoraka se izvodi u nekoliko koraka radi postizanja što jednoličnije površine presjeka. Proces brušenja je najagresivniji postupak u pripremi uzorka za metalografsko ispitivanje uzorka gdje je abraziv ($400\text{-}500\mu\text{m}$) već učvršćen na brusnu podlogu. Brušenje se provodi u pet koraka s različitim finoćama brusnog papira od grubog brušenje brusnim papirom oznake 120 do najfinijeg brušenja papirom oznake 1200. Oznaku brusnog papira čine količina abrazivnih čestica koje pri proizvodnji brusnog papira prođu kroz sito na 1 inč površine. Nakon svake izmjene brusnog papira, metalografski uzorak se uvijek ispiru u vodi, a sljedeće brušenje

počinje zakretanjem uzorka za 90° s obzirom na prethodni smjer brušenja. Nakon otvrdnuća akrilne mase, uzorak je brušen parametrima navedenim u tablici 4.

Tablica 4. Parametri brušenja metalografskih uzoraka

Stupanj brušenja	I	II	III	IV	V
Podloga	SiC papir	SiC papir	SiC papir	SiC papir	SiC papir
Abraziv	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC
Veličina zrna	120	240	320	500	1200
Sredstvo za hlađenje	Voda	Voda	Voda	Voda	Voda
Broj okretaja	300	300	300	300	300
Sila	Ručno	Ručno	Ručno	Ručno	Ručno

4.3.3. Poliranje metalografskih uzoraka

Nakon grube mehaničke obrade metalografskog uzorka brušenjem, slijedila je fina obrada poliranjem. Poliranjem se dobije sjajna glatka površina, koja je jedina mjerodavna za postizanje ispravnih rezultata prilikom metalografskog ispitivanja uzorka. Poliranje se provodi u dvije faze, a parametri svake od njih prikazani su u tablici 5. Nakon poliranja vide se pukotine, poroznosti i nemetalni uključci ukoliko ih uzorak sadrži.

Tablica 5. Parametri poliranja metalografskih uzoraka

Faze poliranja	I	II
Podloga	panot-W	ophem
Abraziv	Dijamantna pasta 6 μm	Dijamantna pasta 1 μm
Lubrikant	Blue	Blue
Broj okretaja, min^{-1}	125	125
Vrijeme poliranja	7 min	7 min
Pritisak	25 N po uzorku	25 N po uzorku

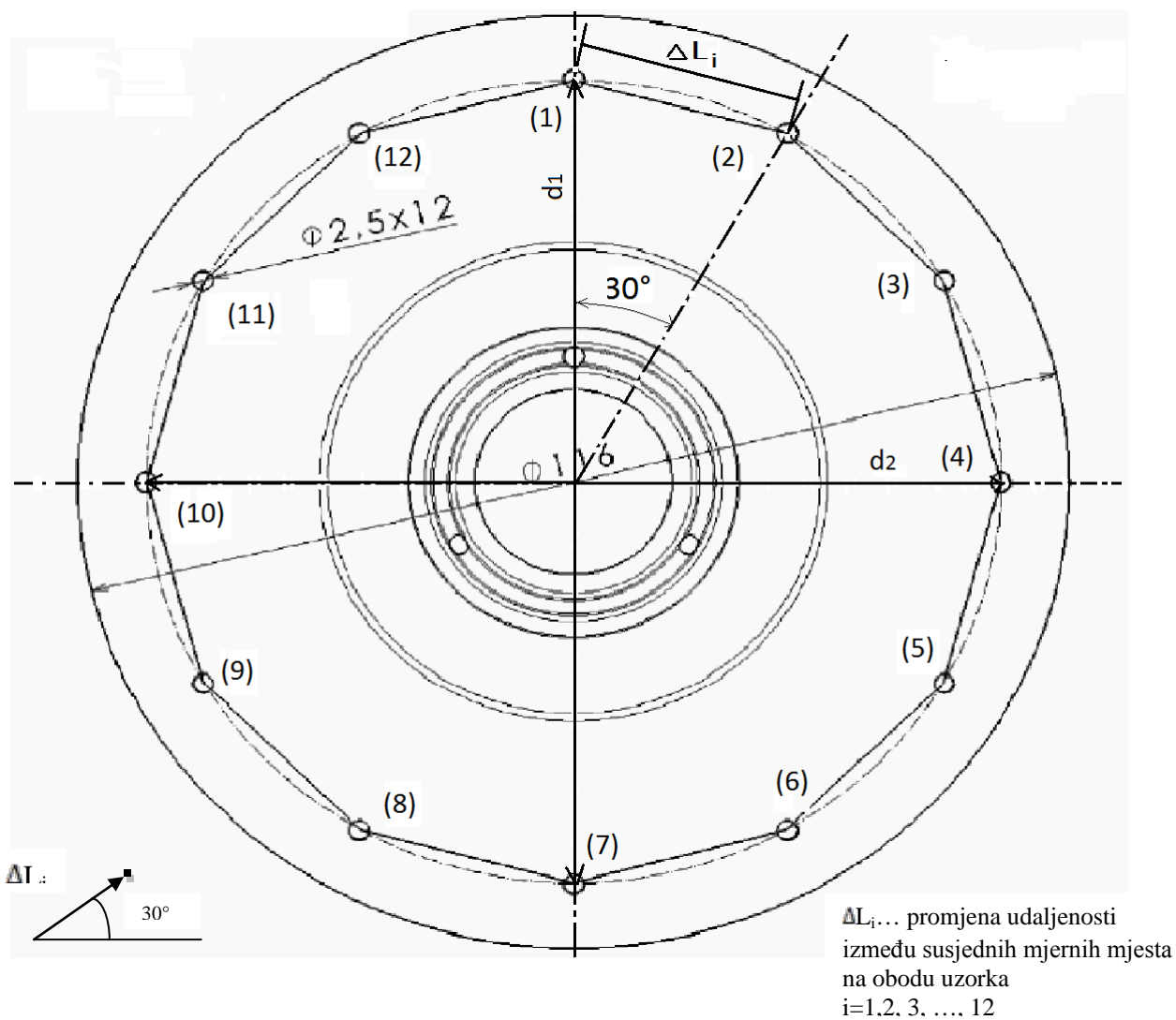
Polirani metalografski uzorci analizirani su svjetlosnim mikroskopom Olympus GX51, s povećanjima 50, 100, 200, 500 i 1000. Mikroskopiranje i fotografiranje mikrostrukture uzorka provedeno je u početnom stanju ali i nakon postupka žarenja na 600°C , u trajanju od 3h, te horizontalnih hlađenjem na zraku.

5. Rezultati ispitivanja i analiza rezultata

5.1. Ispitivanje toplinskih deformacija

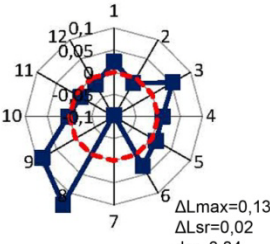
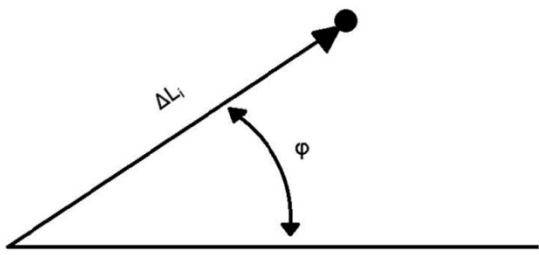
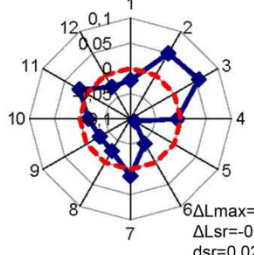
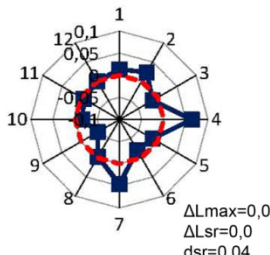
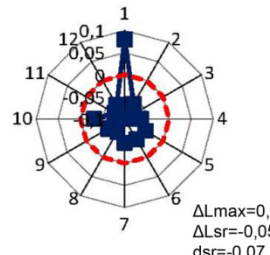
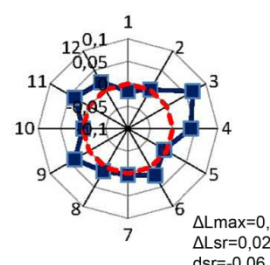
Na svakom ispitnom uzorku promatrano je 14 veličina: udaljenosti između 12 jednako razmaknutih provrta na obodu rašpe i dva međusobno okomita promjera, kako je prikazano na slici 24. Ispitivane dužine i promjeri mjerene su pomičnim mjerilom proizvođača Siemens, uvijek na isti način, prije i nakon postupaka toplinske obrade. Iz mjerenja međusobnih udaljenosti provrta na obodu određena je promjena duljine ΔL_i ($i = 1, 2, 3, \dots, 12$) koja predstavljaju promjenu udaljenosti između susjednih mjernih mjesta **[(1), (2), (3), ..., (12)]**. Veličine d_1 i d_2 predstavljaju promjer zamišljene opisane kružnice na kojoj leže mjerna mjesta. Time je definiran dvanaesterokut čija je promjena opsega odnosno promjena dužina stranica ΔL ukazivala na postojanje naprezanja unutar samog materijala koje je izazvalo deformaciju. Dvanaesterokut se promatra u polarnom koordinatnom sustavu s polarnim koordinatama kao što je prikazano na slici 24.

Rezultate mjerenja ovih 14 veličina u početnom stanju i stanju nakon jednog od tri promatrana žarenja priloženi su u prilogu rada. Grafički prikaz promjene udaljenosti između susjednih mjernih mjesta na obodu uzorka nalazi se u tablici 6 i 7, gdje su osim tri vrst žarenja, varirane i vrijednosti dužine držanja t_z na temperaturi žarenja, položaj hlađenja uzoraka i rashladni medij. Polazno stanje svih uzoraka, odnosno kemijski sastav, tvrdoća i mikrostruktura uzorka uzete su kao konstantne.



Slika 24. Shematski prikaz opisane zamišljene kružnice kojoj pripadaju mjerna mjesta [(1),(2),(3),...,(12)] koja čine vrhove dvanaesterokuta sa stranicama dužinom ΔL . Stranice dvanaesterokuta ΔL_i čine promjenu udaljenosti između susjednih mjernih mjesta na obodu uzorka. ΔL_i , a d_1 , d_2 su veličine temeljem kojih se mogu pratiti deformacije nakon pojedinog procesa žarenja

Tablica 6. Rezultati ispitivanja promjene udaljenosti između mjernih mjesta na obodu ispitnih uzoraka nakon ispitivanih postupaka žarenja na 380 i 600 °C

Toplinska obrada		Promjena udaljenosti ΔL_i , mm		
tž		1h	2h	3h
Žarenje 380 °C				
Žarenje 600 °C	horizontalno hlađeni uzorci			
	vertikalno hlađeni uzorci			

U tablici 6 je prikazana promjene udaljenosti ΔL_i između susjednih mjernih mjesta [(1), (2), (3), ..., (12)] na obodu uzorka. Polazno stanje $\Delta L_i=0$ ($i=1, 2, 3, \dots, 12$) prikazano je crvenom crtkanom bojom na grafikonima, a promjene udaljenosti ΔL_i između susjednih mjernih mjesta nakon toplinske obrade žarenja ucrtane su plavim kvadratićima u polarnom koordinatnom sustavu $\ddot{A}L_i, \varphi$ ($\varphi=30^\circ$). Oznake: 1A, 1B, 1C, 1D, 2 predstavljaju slučajno odabrane skupine uzoraka koje su bile izložene opisanim parametrima žarenja. Podaci mjerenja ΔL_i za svaku od navedenih skupina nalaze se u prilogu rada.

Iz tablice 6 uočava se utjecaj temperature žarenja uz nepromijenjeno vrijeme držanja od 1h. Kod uzoraka žarenih na 380°C srednja promjena razmaka između susjednih provrta iznosi $\Delta L_{i,sr} = 0,02$ mm što je veće nego nakon žarenja na 600°C gdje $\Delta L_{i,sr} = -0,01$ mm. Deformacije su različitog karaktera, nakon žarenja na 380°C javlja se istezanje (dilatacija), a nakon žarenja na 600°C javlja se stezanje (kontrakcija) ispitnih uzoraka.

Zanimljivo je da produženjem držanja pri temperaturi žarenja 600°C od 1h na 2h deformacije (odnosno promjene udaljenosti) između dva mjerna mjesta na obodu uzorka iščezavaju, tj. $\Delta L_{i,sr} = 0$, međutim držanjem na toj istoj temperaturi u trajanju 3h, nastaju nove deformacije iznosa $\Delta L_{i,sr} = -0,05$ mm, tj. pojavljuje se blago skupljanje uzoraka.

Optimalni parametri žarenja za redukciju zaostalih naprezanja, u ovom slučaju nastalih uslijed hladne deformacije lima, za ugljični čelik iznose:

$$T_z = 550 \dots 680^\circ\text{C}, \text{ uz vrijeme žarenja } t_z = 2,5 \text{ min/mm debljine.}$$

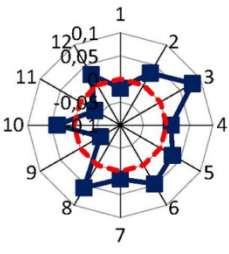
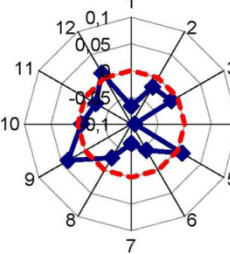
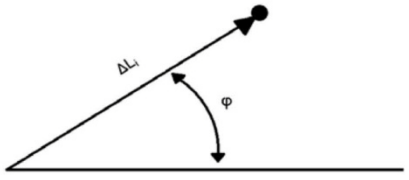
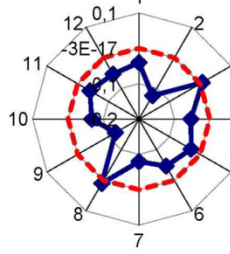
Ovo znači, da je za uzorke debljine 0,7mm optimalno vrijeme držanja na temperaturi žarenja za redukciju zaostalih naprezanja bilo 1,75 min, što upravo pokazuje da su držanja koja su provedena u pokusima žarenja na 600°C prekomjerna za tako tanke uzorke a posljedica toga su unesena nova toplinska naprezanja čije djelovanje je uočeno kroz promjenu udaljenosti ΔL_i .

Hlađenjem na zraku s temperature žarenja 600°C, za različito vrijeme držanja: 1h, 2h i 3h, daje srednju vrijednost udaljenosti između mjernih mjesta na obodu uzorka $\Delta L_{i,sr} = -0,02$ mm, koja je istog iznosa ali suprotnog karaktera u usporedbi sa uzorcima žarenim na 600°C/3h te potom hlađenim u vertikalnom položaju na zraku, gdje je zabilježeno $\Delta L_{i,sr} = 0,02$ mm.

Međutim, kada se usporede vrijednosti $\Delta L_{i,sr}$ za žarenja na 600°C/3h gdje su uzorci hlađeni u horizontalnom položaju $\Delta L_{i,sr} = -0,05$ mm, s uzorcima hlađenim u vertikalnom položaju gdje je $\Delta L_{i,sr} = 0,02$ mm manja deformacija, može se primijetiti najprije da su konačne deformacije različitog karaktera, u prvom slučaju kontrakcije a u drugom dilatacije. Osim toga položaj u kojima se uzorak hladi je zanimljiv, u slučaju kontrakcija uzorak je prilikom hlađenja horizontalno postavljen na podlogu u kojoj se i grijao, gdje se najbrže hlade gornje plohe stoga je razumljivo da nastaju takve deformacije koje iskrivljuju uzorak u smjeru prema dolje odnosno kao da uzorak teži postizanju sfernog oblika. Nadalje, pristup hladnog zraka na stražnju plohu onemogućen je potrebom hlađenja i same podloge na kojoj su uzorci postavljeni tijekom cijelog postupka žarenja, pa je samim time hlađenje sporije nego na prednjoj plohi.

Vertikalnim hlađenjem uzoraka s istim parametrima žarenja 600°C/3h, omogućava se i pretpostavlja približno jednoliki kontakt rashladnog medija na obje plohe uzoraka u seriji. Stoga je razumljivo da su te deformacije manje nego u prošlom slučaju, no smjer iskrivljenja bio je od stražnje prema prednjoj površini, a razlog tome je nepravilna geometrija uzorka kod koje veći dio mase uzorka (udubljenje roto rašpe) čini stražnju plohu koju treba duže hladiti, pa se stoga sporije hladi u odnosu na prednju. Prednja ploha steže time isteže tzv. stražnju plohu što rezultira konačnom blagom dilatacijom uzorka.

Tablica 7. Rezultati ispitivanja promjene udaljenosti između mjernih mjesta na obodu ispitnih uzoraka nakon ispitivanih postupaka žarenja s predgrijavanjem

ŽARENJE S PREDGRIJAVANJEM 380 °C/1h/580 °C/1h		
Sredstvo za hlađenje	PROMJENA UDALJENOSTI ΔL_i (mm)	
	IZMEĐU SUSJEDNIH MJERNIH MJESTA	
	POLOŽAJ UZORAKA PRI HLAĐENJU	
	HORIZONTALNI POLOŽAJ	VERTIKALNI POLOŽAJ
VODA	<p>3C</p>  <p>$\Delta L_{max}=0,08$ $\Delta L_{sr}=0,02$ $dsr=0,03$</p>	<p>3B</p>  <p>$\Delta L_{max}=-0,09$ $\Delta L_{sr}=-0,03$ $dsr=-0,19$</p>
ZRAK		<p>3A</p>  <p>$\Delta L_{max}=-0,19$ $\Delta L_{sr}=-0,05$ $dsr=-0,19$</p>

Tablica 7 grafički prikazuje promjene udaljenosti ΔL_i između susjednih mjernih mjesta [(1), (2), (3), ..., (12)] na obodu uzorka. Polazno stanje $\Delta L_i=0$ ($i=1, 2, 3, \dots, 12$) prikazano je crvenom crtkanom bojom na grafikonima, a promjene udaljenosti ΔL_i između susjednih mjernih mjesta ucrtane su plavim kvadratićima u polarnom koordinatnom sustavu i, φ ($\varphi=30^\circ$). Oznake: 3A, 3B, 3C predstavljaju skupine uzoraka koje su bile izložene odgovarajućim

parametrima hlađenja nakon žarenja pri 580°C/1h s predgrijavanjem na 380°C/1h. Podaci mjerenja promjene udaljenosti ΔL_i za svaku od navedenih skupina uzoraka nalaze se u prilogu rada.

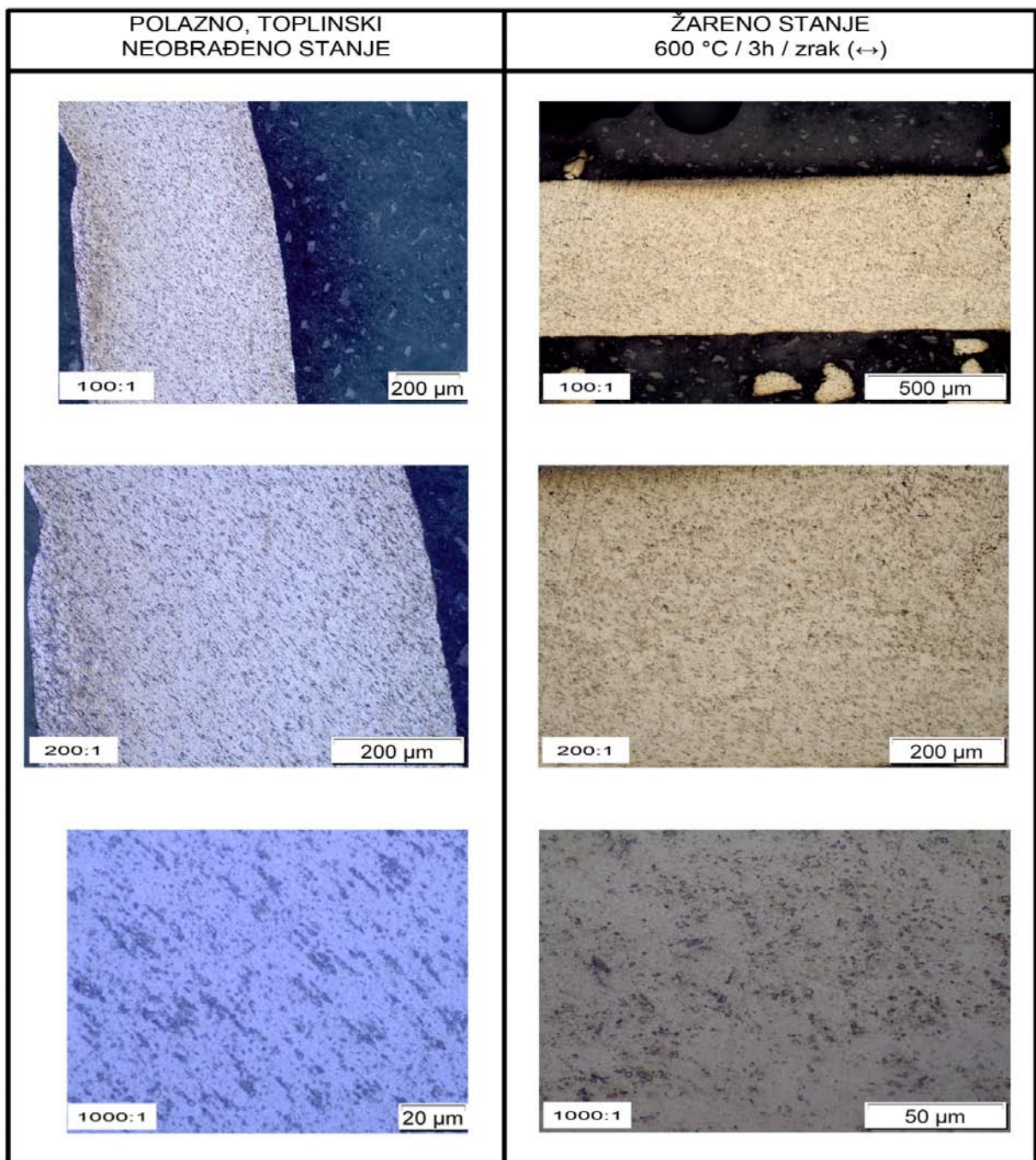
Tablica 7. prikazuje rezultate pokusa predgrijavanja na 380°C/1h a potom žarenja na 580°C/1h, uz variranje parametara hlađenja. Naime, hlađenjem ovako odžarenih uzoraka u horizontalnom položaju u vodi (serija uzoraka 3C) promjena udaljenosti između dva mjerna mjesta [(1), (2), (3), ..., (12)] $\Delta L_{i,sr} = 0,02$ mm, što ukazuje na prisutnost vlačnih naprezanja. S druge strane, ako su uzorci (serija uzoraka 3C) postavljeni u vertikalnom položaju prilikom hlađenja zabilježene su veće deformacije, odnosno promjena udaljenosti između susjednih mjernih mjesta na obodu uzorka iznosi $\Delta L_{i,sr} = -0,03$ mm. Očito je da položaj uranjanja uzorka u rashladni medij ima značajan utjecaj na unos toplinskih naprezanja pri hlađenju, odnosno na konačne deformacije. Horizontalno uranjanje tako osjetljive tankostjene konstrukcije izazvat će iskrivljenja u najslabijim dijelovima uzorka (obod roto rašpe) pošto se uranja cijelom stražnjom površinom što se u praksi izbjegava. Vertikalno uranjanje izaziva blage deformacije na mjestima koja su prva uronjena u vodu, međutim ovaj položaj je u praksi prihvatljiv jer se izabire uranjanje obratka na taj način da duža os tretiranog obratka bude postavljena vertikalno u odnosu na površinu rashladnog medija.

Vertikalnim položajem uzoraka (serija uzoraka 3A) pri hlađenju na zraku zabilježene su promjene dužine stranice dvanaesterokuta $\Delta L_{i,sr} = -0,05$ mm, što je po iznosu veće u odnosu na uzorke iz serije 3B hlađene u vodi, ali istog tlačnog karaktera toplinskih naprezanja.

Općenito usporedbom $\Delta L_{i,sr} = -0,005$ mm hlađenjem uzoraka u vodi neovisno pritom o njihovom položaju, i $\Delta L_{i,sr} = -0,05$ mm hlađenjem na zraku veće deformacije zabilježene su na uzorcima hlađenim na zraku. Iako se to nije očekivalo jer je voda najagresivniji rashladni medij koji se u slučajevima žarenja i sličnih toplinskih obrada ne preporuča radi unosa velikih toplinskih naprezanja. Ipak ne može promaći činjenica da je zrak u laboratoriju u vrijeme ispitivanja bio ispod 10°C dok je gradska voda bila oko 18°C. Možda su upravo te razlike utjecale na sam ishod deformacija.

5.2. Analiza mikrostrukture

Metal je hladnim oblikovanjem deformacijom doveden u stanje povišene razine slobodne energije, pa će prema osnovnim energetske zakonima težiti sniženju te razine. Na slici 25 može se primijetiti da je tijekom žarenja na 600°C/3h došlo do pojave rekristalizacijskog žarenja, koje se očituje u primjetnoj relaksaciji zrna odnosno mikrostrukture, koja je isprva vučena prilikom deformiranja lima. Stoga vidno usmjerena struktura prelazi u fino ujednačenu strukturu sa gotovo potpunim iščezavanjem orijentacije. Nakon snimanja uzorka u polaznom stanju u Schumannovom priručniku za ugljični čelik s 0,1%C moglo se definirati približna istezljivost nastala vučenjem pri proizvodnji lima, koja iznosi $\varepsilon=65\%$. Struktura izrazito teksturiranog ferita i jednoliko raspoređenim cementita poprima nakon žarenja rekristalizirano feritno zrno i jednoliko raspoređen cementit. Pritom glavnu ulogu u odvijanju procesa rekristalizacije, relaksacije i eventualnog porasta rekristaliziranog zrna igra difuzija atoma preko granice zrna. Prisutnost aluminija u kemijskom sastavu uzorka sprječava porast zrna na višim temperaturama. S obzirom na veliki stupanj deformacije uzorka puno je dislokacija i visok je iznos slobodne energije koja teži postizanju nižeg energijskog nivoa. Stoga nije potrebna visoka temperatura za aktivaciju procesa rekristalizacije.

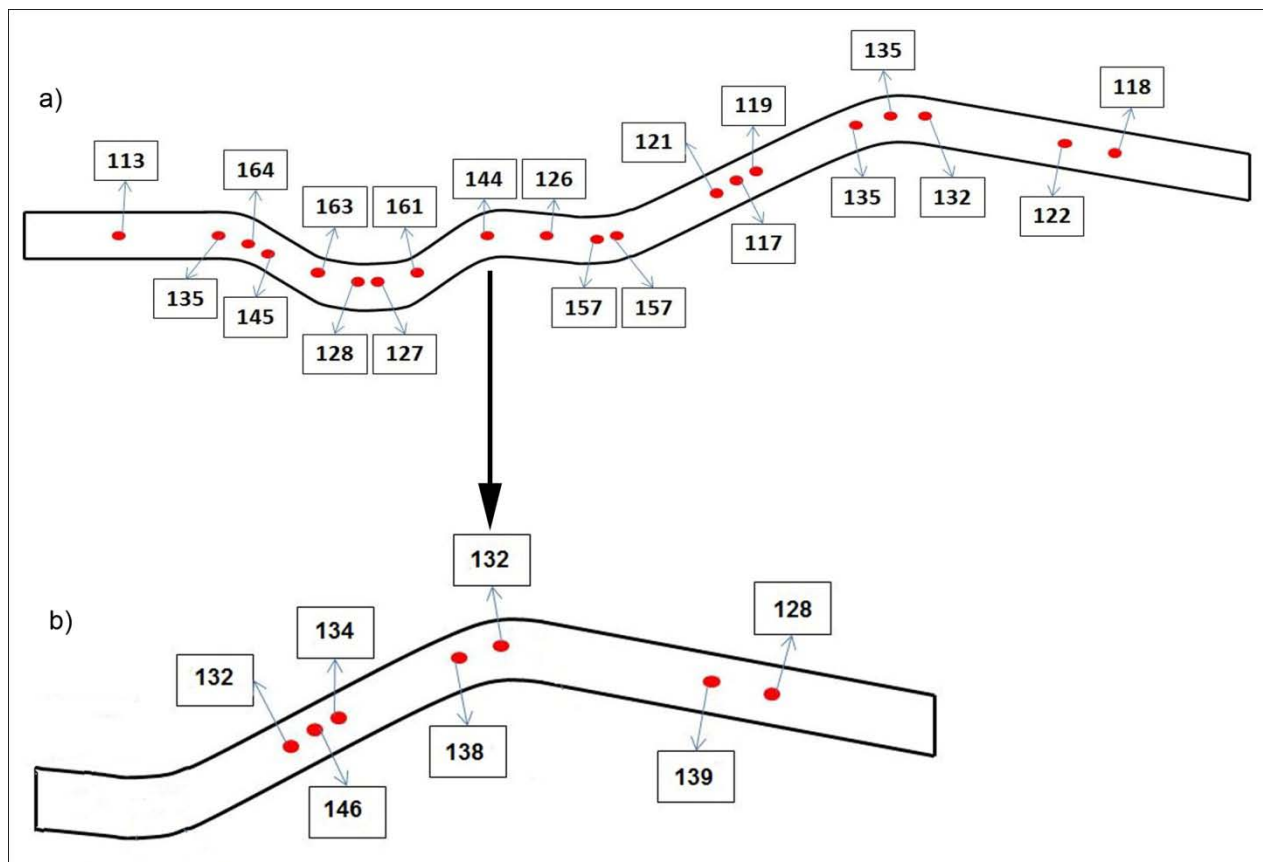


Slika 25. Mikrostrukturno stanje slučajno odabranog uzorka pri različitim povećanjima (50x, 100x, 200x, 500x, 1000x) prije toplinske obrade žarenja na odabranom mjestu I na uzorku

5.3. Ispitivanje mikrotvrdoće

Ispitivanja mikrotvrdoće provedena su po presjeku uzoraka u polaznom stanju i stanju nakon procesa žarenja na $600^{\circ}\text{C}/3\text{h}/\text{zrak}$ metodom Vickers na tvrdomjeru Wilson-Wolbert Tukon[®] 2100B. Prema slici 26.b) može se primijetiti da se nakon žarenja javlja blagi pad tvrdoće po presjeku u odnosu na polazno hladno deformirano stanje (slika 26a)). Pad tvrdoće po presjeku još jednom utvrđuje pojavu rekristalizacijskog žarenja, uslijed kojeg dolazi do relaksacije mikrostrukture i do tada nagomilanih dislokacija. Na slici 26 prikazani su

- Raspored mikrotvrdoće po poprečnom presjeku uzorka toplinski neobrađenog uzorka (polazno stanje nakon izvlačenja i štancanja u hladnom stanju).
- Raspored mjerenja mikrotvrdoće po poprečnom presjeku uzorka nakon žarenja na $600^{\circ}\text{C}/3\text{h}$ i hlađenjem u horizontalnom položaju na mirnom zraku.



Slika 26. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće

6. Zaključak

Toplinska naprezanja i njima uzrokovane toplinske deformacije svojom učestalom prisutnošću u praksi doprinose sve većem interesu istraživača. Analiza toplinskih naprezanja često puta je kompleksan postupak jer se mora voditi računa o brojnim varijacijama utjecajnih čimbenika kao i o mogućem prisutnom sustavu zaostalih naprezanja prije bilo kakvog procesa toplinske obrade.

U cilju razgradnje zaostalih naprezanja provode se procesi toplinske obrade žarenja za redukciju zaostalih naprezanja, ugrijavanjem na temperaturu 400-650°C, dovoljno dugim držanjem te odgovarajućim hlađenjem bez bitnih strukturnih promjena. Osjetljivost na pojavu toplinskih naprezanja se korigira promišljenim odabirom optimalnih parametara toplinske obrade kojima se nastoji smanjiti temperaturne razlike u slojevima obratka, poboljšanjem toplinskih svojstva materijala izborom što kvalitetnije i homogenije legure čelika i ispravnom konstrukcijom obratka.

U eksperimentalnom dijelu provedena je analiza toplinskih naprezanja industrijski izrađenog obratka (roto rašpe) s pravilni rasporedom 12 provrta, koji su služili kao mjerne točke. Praćenjem promjene udaljenosti između dva susjedna provrta na obodu i promjera kružnice na kojij leže mjerne točke, tankostijena i hladno deformirana konstrukcija roto rašpe u ispitivanjima u radu svedena je na dvodimenzionalni objekt dvanaesterokuta, čiji su vrhovi upravo središta provrta roto-rašpe.

Ispitivanjima promjene dimenzija promatranog dvanaesterokuta utvrđen je značajan utjecaj vremena žarenja na 600 °C na pojavu toplinskih deformacija i utjecaj položaja pri hlađenju uzorka. Sporo hlađenje na zraku u vertikalnom položaju uzrokovalo je nešto veću promjenu dimenzija od hlađenja u horizontalnom položaju. Nasuprot tome brzo hlađenje u horizontalnom položaju (u vodi) rezultiralo je manjim deformacijama od brzog hlađenja horizontalno postavljenih uzoraka u vodi.

Ispitivanjem tvrdoće prije i nakon postupka žarenja utvrđeno je sniženje tvrdoće žarenjem što ukazuje na redukciju zaostalih naprezanja i pojavu rekristalizacije čelika na temperaturi žarenja 580 °C, odnosno 600 °C. Pojava rekristalizacije potvrđena je i mikrostrukturnom analizom poprečnog presjeka ispitnih uzoraka u polaznom (hladno oblikovanom stanju) i odžarenom stanju (na 600 °C/3h/zrak).

7. Literatura

- [1]** Krumes D., Toplinska obradba, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2000.
- [2]** Franz M., Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2005.
- [3]** Liščić B., Tensi H.M., Canale L.C.F., Totten G.E., Quenching Theory and Technology, II Edition, Chapter 9, Taylor and Francis Group, L.L.C., 2010.
- [4]** Bletzacker R.W., Effect of Structural Restraint on the Fire Resistance of Protected Steel Beam Floor and Roof Assemblies, Ohio State University, 1966.
- [5]** Landek D., Deformacije alata pri toplinskoj obradi-podloge za vježbe, FSB-Zavod za materijale, Zagreb, 2010./2011.
- [6]** Prabhudev K.H., Handbook of Heat Treatment of Steel, Tata Mc Graw-Hill, 1988.
- [7]** Narazaki M., Kogawara M., Shirayoria A., Fuvhizawa S., Proceedings of Third International Conference on Quenching and Control of Distortion, Prag, Češka Republika, 112-120str. 24.-26.03.1999.; Narazaki M., Totten G.E. i Webster G.M., Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel; Totten G.E., Howes M.A:H., Inoue T., i dr. ASM International, Materials Park, OH, 2002.248-295 str.
- [8]** Von Bergen R.T., Quenching and Distortion Control; Totten G.E.,Ed. ASM International, Materials Park, OH, 1992., 275-282.str